



5G 毫米波 技术白皮书

2020 年 9 月

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



GSMA 代表全球移动运营商的共同权益。GSMA 在更广泛的全球移动生态系统中联结着 750 多家移动运营商，超过 400 家企业，其中包括手机与终端制造商、软件公司、设备供应商、互联网企业以及相关行业组织。GSMA 每年在巴塞罗那、洛杉矶和上海举办业界领先的 MWC 大会以及 Mobile 360 系列区域性会议。

更多有关 GSMA 信息，请阅览 www.gsma.com

关注微信公众号：[@GSMA 集伺盟](#)

目录

写在前面	4
1 5G 毫米波技术简介	5
【小贴士：5G 毫米波的标准进展】	8
2 5G 毫米波技术的优势	10
【小贴士：5G 毫米波的六大优势一览】	14
3 5G 毫米波技术面临的挑战和解决方案	15
3.1 5G 毫米波覆盖优化	16
3.2 5G 毫米波移动性管理	19
3.3 5G 毫米波产品实现	20
3.4 5G 毫米波的测试	22
3.5 5G 毫米波与中低频的共存	23
3.6 5G 毫米波灵活空口实现	24
4 5G 毫米波的应用场景和成功案例	25
4.1 室内外交通枢纽、场馆等热点	26
【案例 1：中国某大型地铁站的 5G 毫米波覆盖仿真】	27
【案例 2：美国 Super Bowl 体育馆的 5G 毫米波网络】	28
【案例 3：明尼阿波利斯 U.S. Bank 体育馆的 5G 毫米波网络】	29
【案例 4：芝加哥城区 5G 毫米波网络的覆盖情况】	30
【小贴士：中国联通将在 2022 年冬奥会应用 5G 毫米波】	31
4.2 行业应用（特别是工业互联网）	32
【小贴士：5G 毫米波在工业互联网中的应用】	32
【案例 5：爱立信与奥迪公司将 5G 毫米波应用于工业互联网】	34
4.3 家庭和写字楼的无线宽带接入（FWA）	36
【案例 6：南美洲某大城市密集城区家庭无线宽带接入仿真】	36
【案例 7：企业办公楼无线宽带接入试验】	38
【案例 8：农村固定无线接入测试】	40
5 总结	41
引用文献	44
致谢	45



写在前面

2020 年是不平凡的一年，也是 5G 开启大规模商用征程的一年。每一次移动产业的周期性更新，都推动着世界的发展和社会的进步。在人类抗击疫情的过程中，5G 证明了自己的价值，也坚定了自己的使命。疫情过后，5G 发展的脚步不会停下，应该会更加坚定和有力。

5G 被广泛认同为工业 4.0 时代的通用使能技术，它将带来用户体验的革命性提升和千行百业的数字化转型，给数字娱乐、医疗健康、能源、制造、交通运输等行业注入新的活力和能量。为此，5G 更加需要发挥出自己的全部潜能，根据业务和用户需求不断发展完善，在追求更高、更快、更强的道路上不断奋进。

5G 毫米波使用更高的频率，实现更快的速率，具备更大的系统容量和更强的业务能力，能够帮助 5G 真正实现最初的全部承诺，达成 5G 最初的全部愿景，所以成为了 5G 重点部署的关键技术。我们也注意到在一些区域，目前 5G 毫米波的优势还没有得到充分重视，产业链还没有真正全面开花，应用场景还是“养在深闺人未识”的状态。

GSMA 长期以来一直致力于推动开放更多频谱用于移动通信，帮助运营商推出更好的网络和更好地服务用户。2020 年 6 月和 8 月，GSMA 组织了两次 5G 毫米波专题论坛，对毫米波的需求、应用场景和技术特点进行了研讨，推出了《5G 毫米波九讲》系列课程；同时，广泛征求运营商、设备制造商、芯片提供商、终端厂商、测试服务提供商、高校、科研院所在内的产业各方的意见，形成了《5G 毫米波技术白皮书》，旨在总结 5G 毫米波的技术优势，阐述 5G 毫米波的创新解决方案，讲解 5G 毫米波的产品实现方案和测试方案，描述 5G 毫米波的应用场景，分享 5G 毫米波的成功案例，推动产业形成对 5G 毫米波的共识，促进 5G 毫米波的技术进步和产业发展。正如中国联通研究院迟永生副院长所说，“5G 毫米波通信既能够给我们提供大带宽高速率的移动业务体验，还能为行业用户提供安全可靠的智慧专网服务。希望未来大家能到北京冬奥会场馆体验高质量 5G 毫米波服务。”

5G 给各行各业提供了一个平台，而 5G 毫米波能够进一步提升这个平台的高度和广度，增加这个平台的价值。希望产业各方能够共同努力，一起推动包括 5G 毫米波在内的各种 5G 技术的应用，充分发挥 5G 的全部潜能。

斯寒
GSMA 大中华区总裁

A photograph of two young women with long dark hair, smiling and looking at their smartphones. The woman on the left is wearing a black and white striped off-the-shoulder top, and the woman on the right is wearing a red top with a white ribbed collar. They are outdoors with a blurred background of trees and a red railing. A large yellow circle with the number '1' is positioned to the left of the women. The bottom of the image features a dark blue background with yellow diagonal stripes.

1

5G 毫米波 技术简介

5G 毫米波技术简介

毫米波在通信、雷达、遥感和天文等领域有大量的应用

顾名思义，毫米波是波长为毫米级的电磁波，通常所指频段为 30 - 300 GHz，往往也包含 24 GHz 以上频段。5G 需要支持更高的速率和更低的时延，为各种新型应用提供前所未有的支持。它相比于 4G 来说，一个关键的提升就是能够利用更多的频谱资源来满足不同种类的业务需求，其中就包括了使用毫米波的频段资源来实现极高带宽和极低时延。

5G 毫米波是通信技术演进的必然方向

随着业务对带宽需求的不断增加，通信频谱不断向更高频谱延伸，5G 毫米波具有丰富的频率资源，是移动通信技术演进的必然方向。Ookla® SPEEDTEST® 的实际测试结果表明，在 5G 毫米波频段现有网络的平均下载速率是 Sub-6 GHz 频段（6 GHz 及以下频段）的 4 倍，约是 LTE 的 20 倍。^[1] 2020 年，5G 已经开始规模商用，整个产业界的目光都开始投向 5G 下一阶段部署的关键技术。这些关键技术中，5G 毫米波由于高带宽、低时延以及其他突出优势，能够充分释放 5G 的全部潜能，从而实现业务体验的革命性提升和千行百业的数字化转型，真正实现“4G 改变生活、5G 改变社会”的愿景，因此受到业界的广泛关注和重视。5G 毫米波和中低频的 Sub-6 GHz 具有各自不同的性能优势，它们之间的互相配合、互相补充，是实现 5G 完整和最优用户体验的关键。

[1] <https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/06/01/mmwave-5g-devices-powered-qualcomm-snapdragon-can-deliver-4x-faster-5g>

[2] Regional Spotlights: Impact of mmWave 5G, GSMA, 2019 年 7 月。

[3] 5G 毫米波在中国的机遇，GSMA, 2020 年 3 月。

[4] mmWave Bands – Global Licensing and Usage for 5G, GSA, 2020 年 6 月。

5G 毫米波将带来巨大的社会效益

5G 毫米波作为高速接入、工业自动化、医疗健康、智能交通、虚拟现实等方面的核心使能技术之一，预计将在 2035 年之前对全球 GDP 做出 5650 亿美元的贡献，占 5G 总贡献的百分之二十五，而在 2034 年之前，在中国使用 5G 毫米波频段所带来的经济受益将达到约 1040 亿美元。^{[2] [3]}

5G 毫米波频谱全球协同分配正在稳步推进

2019 年国际电信联盟（ITU）的世界无线电通信大会（WRC-19）确定了 24 GHz 至 86 GHz 之间的毫米波频段将用于国际移动通信（IMT），其中 24.25-27.5GHz、37-43.5GHz 和 66-71GHz 频段为全球融合一致的 IMT 频段。这标志着全球产业朝 5G 毫米波的最佳性能和规模效应最大化迈出了坚实的一步。目前，全球一些国家和地区已陆续完成了 5G 毫米波频谱的划分及其分配或拍卖。其中，美国分别于 2019 年 1 月和 5 月完成了 28 GHz 和 24 GHz 频段的拍卖，并于 2020 年 3 月进一步完成了对 37 GHz、39 GHz 和 47 GHz 频段的拍卖。欧盟委员会已于 2019 年 5 月通过了一项实施决定，统一 26 GHz 频段的无线电频谱，使成员国能够为频段使用设定共同的技术条件并开放使用，目前意大利、芬兰、挪威已经完成部分频谱的分配或拍卖。在亚洲，日本、韩国、泰国、中国香港和中国台湾已经完成了 26 GHz 和 28 GHz 部分频谱的分配或者拍卖。而截止到 2020 年 6 月，17 个国家和地区的 79 个运营商已经拥有了在 24.25 ~ 29.5 GHz 部署 5G 毫米波的频率许可。^[4]

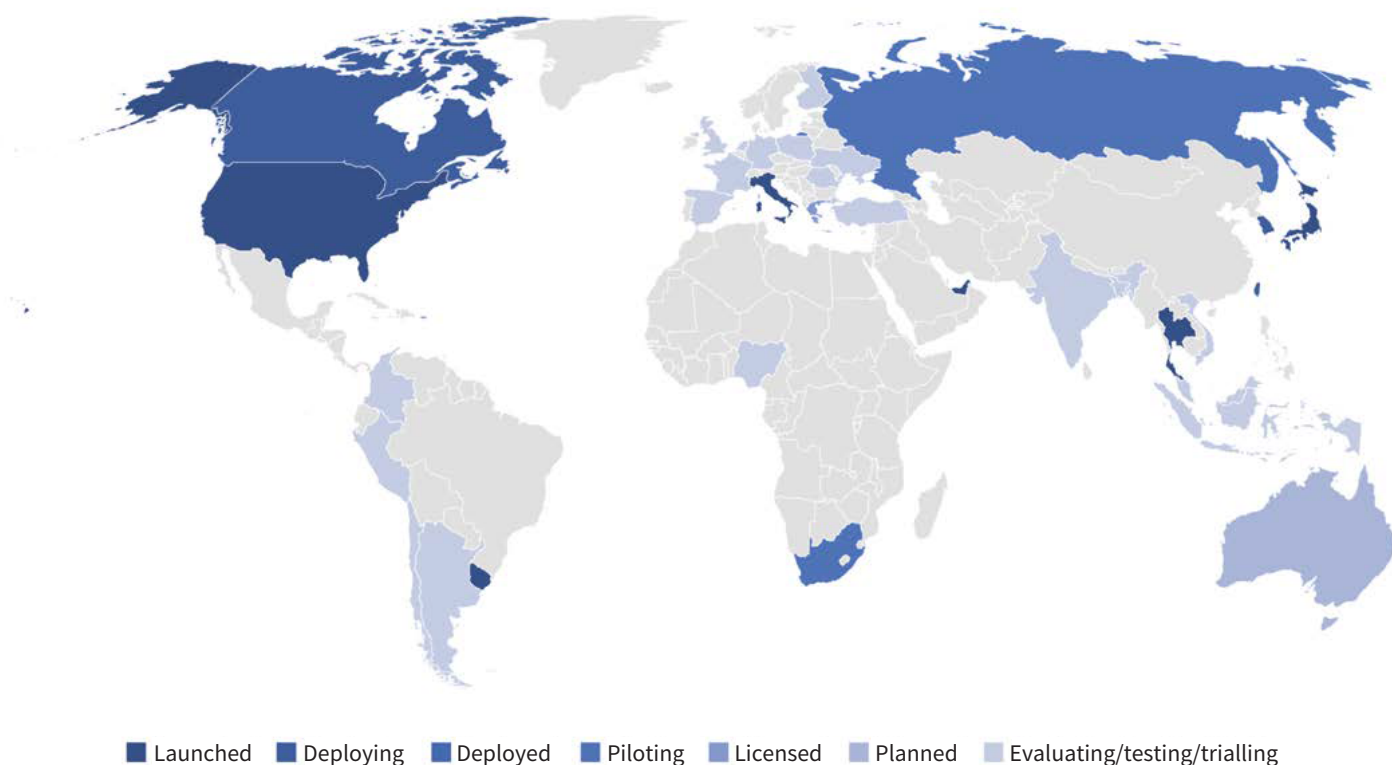


图 1 全球运营商 5G 毫米波 24.25 ~ 29.5 GHz 投资情况

5G 毫米波产业链已经基本成熟

当前国内外 5G 毫米波产业发展生态已经比较完整，具备部署和商业化的条件。^[5] 目前主流的移动通信设备提供商都已经推出了支持 5G 毫米波的基站设备，他们中的部分厂商已经开始销售第二代或者第三代产品。芯片厂商和终端设备厂商也已经发布了一些 5G 毫米波产品，全球供应商协会（GSA）的报告指出，截至 2020 年 6 月，全球共有 84 个已发布的 5G 设备明确支持或将支持 5G 毫米波频段。^[4] 近期一加手机还推出了首款由中国厂商出品的支持 5G 毫米波的智能手机 OnePlus 8 毫米波版。

5G 毫米波已经开始商用部署

随着全球 5G 网络部署向纵深挺进，5G 毫米波的商业部署也在全球各地逐渐展开。美国的几大主流通信运营商包括 AT&T、T-Mobile 和 Verizon 都已经提供了 5G 毫米波的商业服务，而包括日本 NTT DOCOMO^[6]、日本 KDDI、韩国 SKT 在内的多个运营商也已经开始了 5G 毫米波系统商业部署。GSA 表示，2020 年 6 月，仅在 24.25-29.5 GHz 频谱范围内，全球已有 42 个国家 / 地区的 123 个运营商以试验、许可证、部署或运营网络的形式进行了 5G 投资，具体分布情况如图 1 所示。^[4]

- [4] mmWave Bands – Global Licensing and Usage for 5G, GSA, 2020 年 6 月。
 [5] GTI 5G mmWave Spectrum White Paper, GTI, 2019 年 1 月。
 [6] <https://www.nttdocomo.co.jp/english/product/data/sh52a/>

5G 毫米波在中国得到政策的有力支持

中国政府早在 2017 年 7 月就批准在 24.75-27.5 GHz 和 37-42.5 GHz 的 5G 毫米波频率范围内使用 5G 技术开展研发试验。中国工业和信息化部在 2020 年 3 月《关于推动 5G 加快发展的通知》中明确指出，将结合国家频率规划进度安排，组织开展毫米波设备和性能测试，为 5G 毫米波技术商用做好储备，适时发布部分 5G 毫米波频段频率使用规划。^[7] 2019 年以来，中国 IMT-2020 (5G) 推进组统筹规划，分三个阶段推进 5G 毫米波的试验工作：2019 年重点验证 5G 毫米波关键技术和系统特性；2020 年重点验证 5G 毫米波基站和终端的功能、性能和互操作，2020 到 2021 年开展典型场景应用验证。爱立信携手一加手机完成 5G 毫米波商用系统和商用智能手机端到端测试，在室内室外各种环境下均表现出稳定优异的性能；诺基亚贝尔与基于芯片的测试终端配合，成功展示 5G 毫米波 4Gbps 峰值性能，拉远测试在 1200 米处、和非视距场景及人体遮挡等测试场景下，下行速率仍可达数百兆至 2Gbps；OPPO 携手爱立信，实现了 5G 毫米波商用系统与商用 CPE 的端到端测试，4.06Gbps 的下行速率以及 210Mbps 的上行速率，并在拉远测试中，2.3 千米处仍然保持 200Mbps 的下行速率。^[8]

【7】关于加快 5G 发展的通知，工业和信息化部，

【8】5G 推进组微信公众号，2020 年 9 月 2 日、9 月 3 日、9 月 15 日、9 月 16 日文章。

5G 毫米波在冬奥会上将大放异彩

2022 年冬奥会将在中国北京举办。北京冬奥组委会对这项国际性顶级赛事的通信保障和服务提出了新的技术要求，要求为广大观众、媒体转播者、赛事组织者和参与者提供优质的观赛体验和网络服务，因此 5G 网络部署将发挥至关重要的作用。冬奥会通信服务场景复杂多样，既存在室内热点的高容量通信需求，又存在室外的广阔覆盖的需求必要，为展现 5G 毫米波技术优势提供了绝佳展台。作为 2022 年北京冬奥会官方唯一通信运营商合作伙伴，中国联通将综合运用 5G 毫米波等多种技术手段，打造超大带宽的智慧无线场馆，更好地为各方提供优质的网络服务保障。可以期待，在冬奥会上的应用将成为中国 5G 毫米波大规模商用以及 5G 毫米波产业链快速发展的重要里程碑。

小贴士：5G 毫米波的标准进展

在 5G 标准制定之初，5G 毫米波就是 5G 技术的主要组成部分之一，是 5G 性能指标的重要保证，它的标准化工作与中低频是同步展开的，目前 3GPP 已经完成了 Rel-15、Rel-16 两个版本的 5G 标准，均支持工作在毫米波频段。图 2 是 3GPP 标准时间表。

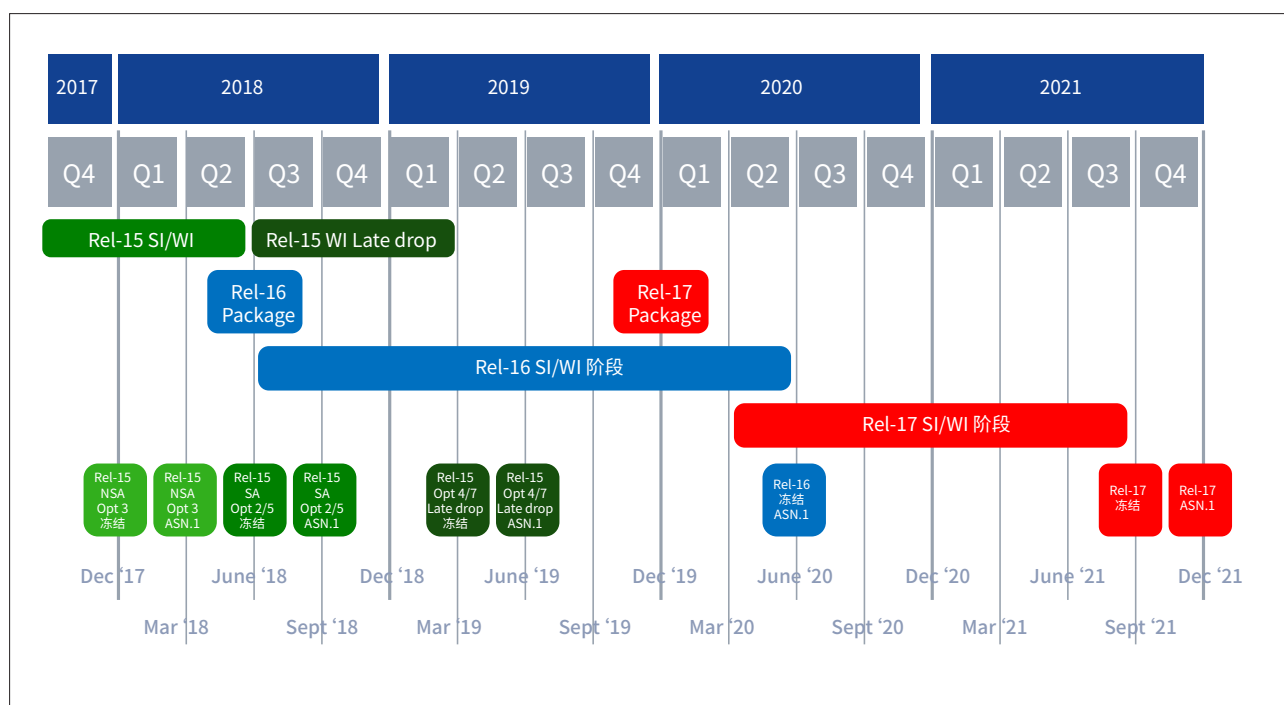


图 2 3GPP 标准时间表

3GPP 新空口 (NR) Rel-15 完成了包含 5G 毫米波的第一版 5G 标准，包括非独立组网 (NSA) 以及独立组网 (SA) 两种模式的规范，可以面向多种场景提供多种业务，包括 eMBB 及 URLLC 业务。其中 5G NSA 模式 (Option 3 架构) 对应的规范及 ASN.1 已分别在 2017 年 12 月及 2018 年 3 月冻结；5G SA 模式 (Option 2/5 架构) 对应的规范及 ASN.1 已分别在 2018 年 6 月及 9 月冻结；延迟版本 (Option 4/7 架构) 已分别在 2019 年 3 月及 6 月冻结。

3GPP NR Rel-16 完成了包含 5G 毫米波的第二版 5G 标准，与 NR Rel-15 兼容，重点增强垂直行业应用及提升整体系统性能。NR Rel-16 主要增强了载波聚合功能，优化了波束管理功能，新增了 multi-TRP 传输模式和集成接入与回传 (IAB) 等功能，并为 NR 网络引入了定位功能。NR Rel-16 规范和 ASN.1 已于 2020 年 6 月冻结。

3GPP NR Rel-17 是包含 5G 毫米波的第三版 5G 标准，将进一步增强 5G 毫米波功能。NR Rel-15 中定义的 5G 毫米波频段上限为 52.6 GHz (Frequency Range 2)，NR Rel-17 将考虑更高频段，即对 52.6 GHz 以上频段进行研究，重点是 52.6 - 71 GHz。另外，NR Rel-17 积极拓展以对未来制造业和工业控制支持，对 IIoT 和 URLLC 技术增强，包括利用波束扫描技术提升传输可靠性和在更宽领域内终端之间的实现时间敏感通信；对 MIMO 技术增强，特别是增强上行 multi-TRP 传输方案，提高低层空口移动性管理功能，以及提供更简洁的波束管理机制；对 IAB 增强，支持接入和回传链路的空分复用提高频谱利用率；支持更高精度定位等。相应规范预计于 2021 年底冻结 (注：有延期可能)。



2

5G 毫米波 技术的优势

5G 毫米波技术的优势

和中低频段相比，5G 毫米波具备多个突出优势。这些优势使得 5G 毫米波备受业界关注，被认为是用户体验革命性提升和各行各业数字化转型的关键使能技术。

1 频率资源丰富、带宽极大

5G 毫米波技术第一个优势，同时也是最重要的优势，是**频率资源丰富、带宽极大**。5G 毫米波之所以受到重视，是因为其相较于 5G Sub-6 GHz 频段（FR1）具有更丰富的频谱资源（如图 3 所示），是 5G 网络提供千兆连接能力的主要方式，是实现 5G 最初愿景的有力保证。毫不夸张地说，要达到 5G 最高速率要求，就必须使用 5G 毫米波。

5G 毫米波网络可轻易实现 Gbps 级别的峰值吞吐率。比如在 26 GHz 频段内分配连续 800MHz 频谱，采用四个单载波 200MHz（4*200MHz）或者八个单载波 100MHz（8*100MHz）实现载波聚合传输，基于

3GPP 标准可用的信道宽度和调制方式，结合先进的天线设计和射频处理技术，5G 毫米波系统可以轻松获得数 Gbps 以上的峰值数据吞吐率。目前 5G 毫米波已经在部分国家和地区商用，基于 Ookla® SPEEDTEST® 最新实测结果，5G Sub-6GHz 网络的平均下载速率比 4G LTE 快 5 倍，而 5G 毫米波网络的平均下载速率与 5G Sub-6 GHz 相比又快了 4 倍，平均速率高达 900Mbps，峰值速率超过 2Gbps。这一结果是在 400MHz 带宽实现的，未来使用 800MHz 带宽将有望得到更好的结果。^[1] 因此，与 5G sub-6 GHz 相比，5G 毫米波技术对于用户峰值速率仍有强势提升。

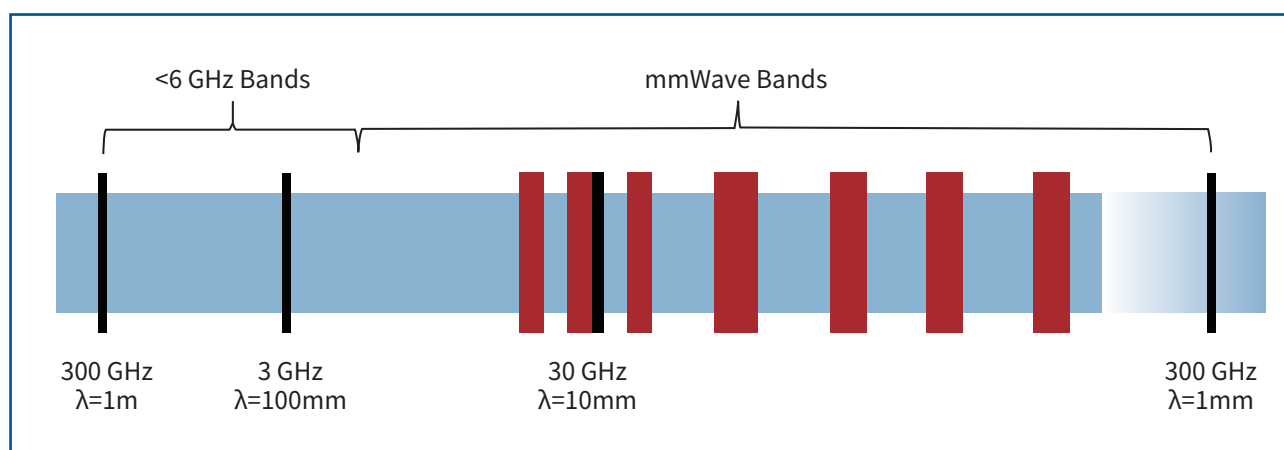


图 3 5G 毫米波频谱资源

【1】 <https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/06/01/mmwave-5g-devices-powered-qualcomm-snapdragon-can-deliver-4x-faster-5g>

2

易与波束赋形技术结合

5G 毫米波技术第二个优势是**易与波束赋形技术结合**。5G 毫米波的频段高、波长短，使得其在设计和部署上有空间优势，非常适合与波束赋形技术相结合，增强性能并降低干扰。波束赋形技术能够在单根天线功率很低的情况下，依然提供很好的信号质量。由于波长较短，5G 毫米波设备的天线阵列可在有限尺寸空间内放置更多天线阵子，特别是 5G 毫米波基站的天线阵子数量可以达到 256、512 甚至更多，因此无论上行下行均可获得极大波束赋形增益。典型天线阵列配置下，假设基站有 256 个天线阵子，而终端有 8 根天线，此时 5G 毫米波能够获得的理论波束赋形增益如表 1 所示。

受益于波束赋形技术，5G 毫米波信号通信距离大幅增强，可以用于短距传输和室内热点覆盖之外的更多场景。例如在使用 5G 毫米波基站进行室外覆盖时，覆盖半径可达数百米或几千米，在许多情况下可以与现有 4G 和 5G 中低频小基站实现共址共站。图 4 对 5G 毫米波基站和 4G LTE 基站（工作在

表 1 5G 毫米波频段典型波束赋形增益

天线	天线阵元数	理论波束赋形增益
基站	256	24dB
终端	8	9dB

Band2 和 Band4) 共站部署时下行覆盖情况进行了仿真对比分析。图中根据某大型城市的 0.8 平方公里区域的场测结果，比较了 28 GHz 和 39 GHz 两种毫米波基站的部署情况，4G LTE 基站的基准部署密度是 73 站/平方公里。从图中可见，在进行室外覆盖时，如果 5G 毫米波基站和 4G LTE 基站完全共站部署，数量相等的话，5G 毫米波网络下行覆盖率可以达到 77%。如果稍微增加 5G 毫米波基站数量，5G 毫米波网络下行覆盖率可以达到 95%。

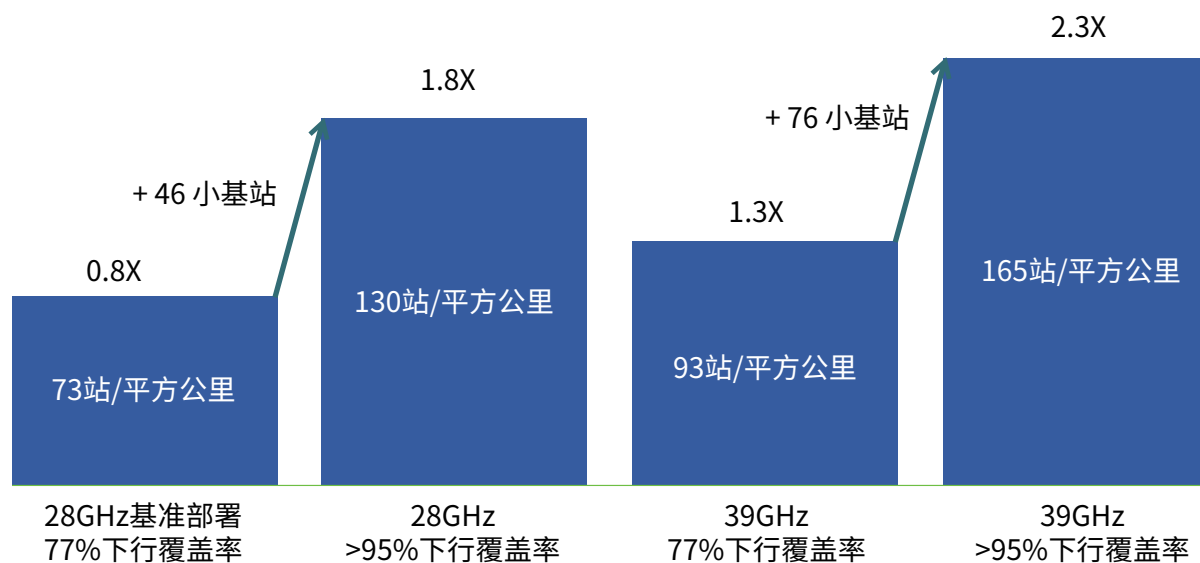


图 4 5G 毫米波基站与 4G LTE 基站共站时覆盖效果比较

3 可实现极低时延

5G 毫米波技术第三个优势是**可实现极低时延**。通常来说，5G 网络是以时隙为单位调度数据的，空口时隙长度越短，意味着 5G 网络在物理层的时延越小。如表 2 所示，5G 毫米波系统空口时隙长度最小可至 0.125ms，是目前主流 5G 中低频系统的 1/4。如果采用短时隙（mini slot）调度，空口时延还会更小。因此，5G 毫米波系统比 5G 中低频系统空口时延显著降低，是满足 5G 空口时延小于 1ms 的有力保证，可实

现 5G 网络对工业互联网、AR/VR、云游戏、实时云计算等 URLLC（高可靠低时延）业务的质量承诺。例如，AR/VR 业务为保证多感官协调体验和交互能力，需要毫秒级的时延；而工业互联网对低时延有非常明确的需求，典型的工业机器人网络对于时延的要求是毫秒级，产品线上的远程实时控制也需要毫秒级的时延保证，而工业视觉等领域引入人工智能所需的大规模计算往往需要在一定距离外进行，同样对空口时延提出了更高要求。

表 2 5G 网络不同频段可配时隙间隔

频段	子载波间隔	时隙长度
1 GHz	15/30kHz	1/0.5ms
1 GHz ~ 6 GHz	15/30/60kHz	1/0.5/0.25ms
24.25 ~ 52.6 GHz	60/120kHz	0.25/0.125ms

4 可支持密集小区部署

5G 毫米波技术第四个优势是**可支持密集小区部署**。与 5G 中低频系统不同的是，5G 毫米波系统通过波束赋形技术不但可提高目标对象信号增益，还可利用波束定向的特点将信号能量聚焦在特定方向来减小对其它非目标对象的干扰，保证邻近链路或者邻近小区通信质量。因此，与 5G 中低频系统相比，5G 毫米波系统更容易实现密集小区部署。

这使得 5G 毫米波系统很适合在大型场所如会议室、音乐会、体育馆、地铁站等人口密集区域进行部署。比如，基于 5G 毫米波的 AR 可以在远程办公场景中提供虚拟临场体验用于培训及会议，或者在体育场馆观看足球比赛时，通过虚拟和增强的方式来享受最喜欢的体育明星的比赛，并且是实时动作影像和录像片段叠加的效果。

5 可进行高精度定位

5G 毫米波技术的第五个优势是**可进行高精度定位**。5G 毫米波波束窄、方向性好，有极高的空间分辨力；同时由于信号传输周期小、时间精度高，5G 毫米波有望实现厘米级的定位，即使和全球卫星定位导航系统相比也有精度和速度上的优势。尤其在卫星导航信号较弱的室内环境，5G 毫米波的定位

能力将发挥更为重要的作用，能够在工业互联网、物流运输、车联网、交通枢纽、大型场馆和园区等应用场景提供快速高精度定位服务。工业互联网里面有许多场景需要高精度定位，例如物料的自动运输，工业机器人完成铆接、焊接、组装、剪裁等精密机械操作，产品的自动检测和封装等等。

6 设备集成度高

5G 毫米波技术的第六个优势是**设备集成度高**。相对于 Sub-6 GHz，5G 毫米波元器件的尺寸要小得多，5G 毫米波设备更容易小型化和微型化。当 5G 毫米波规模商用后，相关元器件成本会大大降低，在专业设备、

可穿戴设备、智能零部件等领域 5G 毫米波集成度高的优势意味着广阔的应用前景。另外，5G 毫米波基站也具有体积小、重量轻、易安装的优势，有利于打造一个绿色、高效和方便部署的 5G 毫米波网络。

小贴士：5G 毫米波的六大优势一览

表 3 5G 毫米波技术的六大优势

优势	收益
频率资源丰富、带宽极大	峰值速率和平均速率高（数 Gbps），容量大
易与波束赋形技术结合	提供定向性，提高信号强度，增强性能并降低干扰
可实现极低时延（亚毫秒级）	支持工业物联网、AR/VR、云游戏、实时计算等业务
可支持密集小区部署	适用于大型场馆和交通枢纽
可进行高精度定位	应用于工业互联网、物流运输、车联网和室内的快速高精度定位
设备集成度高	基站和终端的小型化、微型化



3

5G 毫米波技术 面临的挑战和 解决方案

5G 毫米波技术面临的挑战和解决方案

1 5G 毫米波覆盖优化

5G 毫米波频段高、**传播损耗高、绕射和衍射能力弱，覆盖相对受限**，这是 5G 毫米波通信系统面临的重大挑战。高频通信传播过程中的路径损耗较大，从室外到室内的穿透损失较大，以及遇到建筑物、树叶或雨水阻挡的影响较大。根据 3GPP TR38.901^[9] 中规定的 0~100 GHz 无线电波在城市区域内

直射路径的损耗模型可知，自由空间损耗与载波频率成正相关，26 GHz 载波比 3.5 GHz 载波路损高约 17.42dB，理论传播距离只有 3.5GHz 的六分之一左右。根据中国联通的实测结果^[10]，5G 毫米波的穿透损耗远高于 Sub-6GHz (如表 4 所示)，同时恶劣天气如雨、雪、雾等对毫米波的传播也有不利影响。

表 4 5G 毫米波穿透损耗测试结果

树冠（直径 4m）	人体（单侧 / 周围）	混凝土承重墙	木门（5cm）	普通玻璃门	房车车体
20dB	11~28dB	无法穿透	6dB	5dB	17 ~ 23 dB

5G 毫米波这个特性使大家误以为它只能够实现视距传输，然而现在已经有多种解决方案来解决 5G 毫米波信号衰减和阻挡的问题。首先，5G 毫米波通过先进的**波束赋形**技术增加 EIRP（等效全向辐射功率），提升覆盖能力，能够轻松实现数百米的信号传输，缓解路径损耗问题。这项技术不仅通过仿真实验得到了验证，而且在外场测试^[11]和商用部署中也得到了充分检验。其次，在 5G 标准化中，5G 毫米波**波束管理**成为 5G 毫米波标准化的工作重点，其中包括波束搜索、波束跟踪以及波束切换

等，使 5G 毫米波系统能在部分方向信号受到遮挡的情况下迅速捕捉新波束并动态地实施波束切换。最后，半导体技术的进步推动了 5G 毫米波技术快速发展，将大规模阵列天线和射频链路整合成性价比更高的**相位阵列** RFICs，并成功实现了智能波束赋形、波束搜索和波束跟踪技术，从硬件上为 5G 毫米波系统提供了强大支持。

[9] 3GPP TR38.901, https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.901/38901-g10.zip

[10] 中国联通 5G 毫米波技术白皮书，中国联通，2019 年 11 月。

[11] <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2020/9/ericsson-qualcomm-and-u.s.-cellular-achieve-extended-range-5g-data-call-over-mmwave>

这些技术进步不仅使 5G 毫米波可以通过波束赋形的优势弥补 5G 毫米波在传播特性上相对于 5G 中低频段的不足，还使 5G 毫米波系统可以很好地利用多路径和反射，并通过先进的波束管理技术在不同连接、路径间自如切换。如果视距传输路径被阻挡，5G 毫米波系统仍然能够通过智能波束搜索技术快速寻找和识别非视距传输路径（比如反射路径），迅速切换到相应传输路径，从而解决 5G 毫米波信号视线传输阻挡问题。

在 Rel-16 中，3GPP 还支持用 **IAB（集成接入与回传）技术**来增强 5G 毫米波网络覆盖能力，利用 5G 毫米波超大带宽提供回传链路，有助于将 5G 天线安装到难以部署光纤或者部署光纤成本过高的地方，比如在高层建筑、孤立岛屿上或铺设光纤存在问题的山区中，从而降低部署成本加快部署进度，实现 5G 网络无缝覆盖。在发生各种自然灾害

导致传统回传链路失效的时候，IAB 也可以发挥重要作用。如图 5 所示，一方面，IAB 技术可通过无线回传方式扩大 5G 毫米波网络覆盖范围；另一方面，IAB 技术又可通过接入和回传链路的共享频谱资源提高容量。而且，IAB 技术支持多跳连接和网络拓扑自适应的功能，使 5G 毫米波网络覆盖范围可以灵活延伸，站间连接更加灵活，网络拓扑限制更少；支持 OTA 同步及节点发现功能，使得 5G 毫米波基站间同步更加简单，接口更加智能，部署更加便捷；支持接入链路和回传链路的协同，实现在物理层资源的分配、波束管理、干扰管理等方面的一体化，充分整合不同链路资源，提高整体效率；提升了 MAC 层移动性管理、快速链路恢复、QoS 管理、负载均衡等方面对 5G 网络进行了增强，提高了网络鲁棒性，使 5G 毫米波网络能对网络故障进行快速反应，动态调整和恢复。

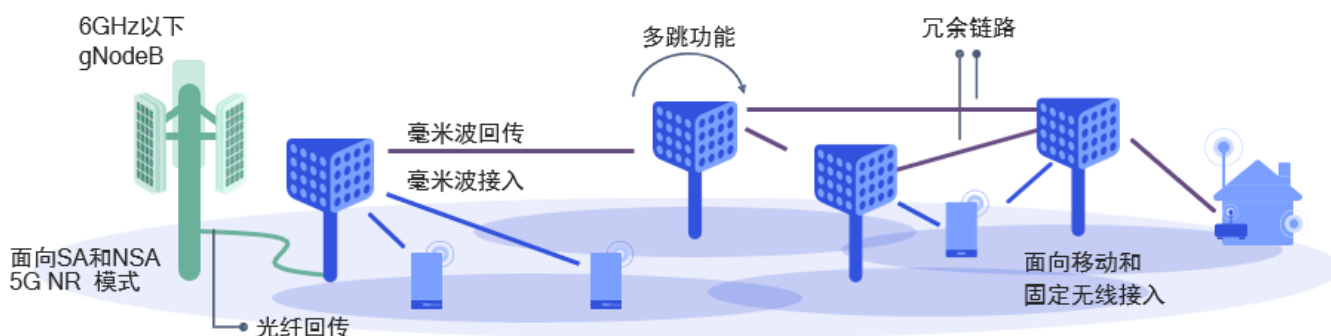


图 5 IAB 既可以扩大 5G 毫米波覆盖范围，又可以提高容量

Small Cell 技术是 5G 毫米波覆盖问题的另一个解决方案。5G 时代，单一基站类型很难满足所有通信需求和部署场景。与 5G 中低频宏站技术相比，5G 毫米波 Small Cell 基站覆盖半径相对较小，部署密度更大，通过减小通信距离来保证峰值吞吐量，并通过提高部署密度来充分保证覆盖效果。

5G 毫米波 Small Cell 基站部署场景广泛，既能室内部署，也能室外部署，为匹配不同部署场景和使用需求，5G 毫米波 Small Cell 基站可以呈现出从分布式到集中式等不同 5G 网络架构形态。5G 毫米波 Small Cell 基站最典型的部署场景是各种热点地区，比如会议室、大型体育场馆、音乐厅，各类交通枢纽如机场、火车站、地铁站等。一方面，这些场景通常对 5G 连接需求更高，负载压力更大。如果仅选择部署 5G 中低频宏站，不仅容易造成基站流量过载，也容易发生用

户接入失败等问题，造成用户网络使用体验下滑。5G 毫米波 Small Cell 基站高容量特性可对宏基站负载进行有效分流，提高用户接入成功概率，保证用户连接稳定性和体验的一致性。另一方面，这些场景通常可以通过 5G 毫米波 Small Cell 基站的高密度部署来回避信号穿墙损失，并且不用担心雨水和树叶遮挡的影响，可以全天候工作。由于覆盖距离短，5G 毫米波 Small Cell 基站信号质量能够得到保证，可稳定维持极高的通信速率。

此外，与宏基站相比，5G 毫米波 Small Cell 基站更容易实现低功耗、低成本和轻量化，同时具有兼容性和开放可控性。因此，5G 毫米波 Small Cell 基站可简化高密度网络部署，实现即插即用、智能组网的弹性超密集网络，有效降低对基站的安装要求和缓解宏基站选址难题。

2 5G 毫米波移动性管理

5G 毫米波面临的第二个挑战是**移动性管理问题**。由于高频信号传播特点，5G 毫米波小区覆盖半径通常较小，终端在移动状态下由于小区切换较频繁而易于出现数据传输中断。对此，3GPP 标准中为 5G 毫米波移动性管理难题给出了两个关键解决方案，以保证无缝的用户体验。首先是各种**灵活快速的小区切换方案**。既可以是基站内的切换，也可以是基站间的切换；既可以是基于高层信令的切换，也可以是基于低层指示的切换，由此充分满足不同场景的小区切换需求。其次是**快速的波束恢复机制**。一旦发生波束失败后，5G 毫米波系统能够在无需核心网和高层信令的干预下实现毫秒量级地快速波束恢复。

此外，载波聚合（CA）技术和双连接（DC）技术可以将中低频和 5G 毫米波有机结合起来。如图 6 所示，运营商可以采取“5G Sub-6 GHz/4G LTE+ 毫米波”的 5G 部署策略，使用 CA 或者 DC 技术，充分利用低中、高频段各自的优势，用 5G Sub-6 GHz 或 4G LTE 网络确保网络覆盖并负责信道获取、寻呼和移动性管理等功能，用 5G 毫米波提供数 Gbps 速率和超大容量。特别值得一提的是，在 3GPP 标准中，5G 毫米波和 Sub-6 GHz 拥有几乎相同的空口协议（比如共同的 MAC 层），因此 5G 毫米波和 Sub-6 GHz 网络可以进行紧密集成，非常容易进行载波聚合。

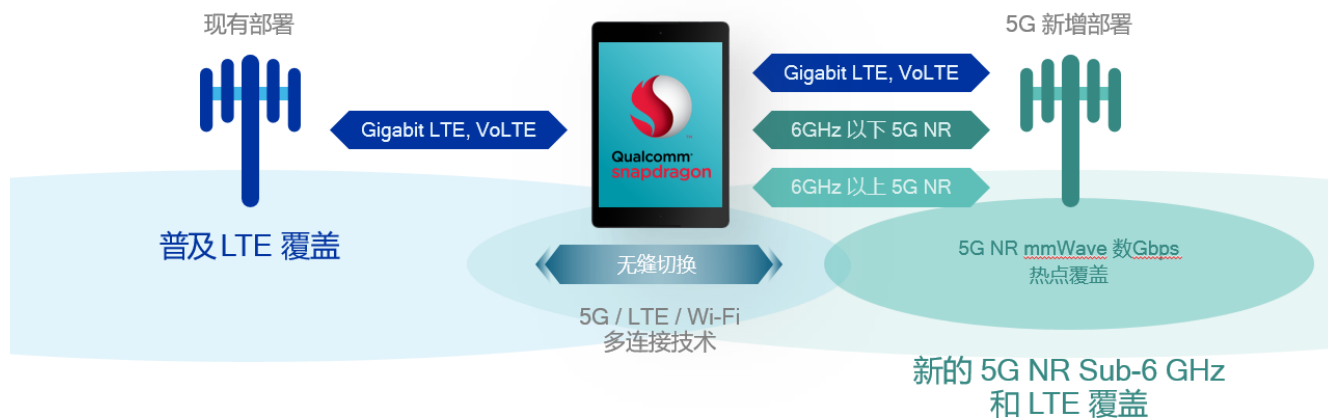


图 6 5G 毫米波网络与 Sub-6 GHz、4G LTE 网络有机结合提供极致用户体验

在 Rel-16 中，3GPP 还完善了 Multi-TRP 功能，对于支持 **Multi-TRP** 的高频手机可同时支持两个波束的接收，这样在一个基站的传输链路被遮挡或快速衰落时，另外一条传输链路依然通畅，可有效避免毫米波的衍射效应差的特性。

3

5G 毫米波产品实现

5G 毫米波面临的第三个挑战是**产品复杂性高，实现难度大**。5G 毫米波基站至少面临三个挑战。首先，5G 毫米波需要安装更多天线，天线校准问题变得更复杂。为了实现 5G 通信所必需的精准波束赋形，5G 毫米波基站需要能够精确地控制每根天线相位信息。受到工艺水平限制，实际天线阵列可能存在较大的初始相位校准误差，这将导致波束赋形失真，严重影响通信性能。因此 5G 毫米波需要重点突破大规模阵列天线的相位校准难题。其次，5G 毫米波需要更高的 EIRP，目前来看 CMOS 工艺可以实现高频段的射频性能，但有更好性能的 GaAs、GaN 工艺在成本上、集成度上还有明显的差距，这导致了 5G 毫米波产品的复杂度和成

本比较高。第三，未来 5G 毫米波 MIMO 在实现更高流数上面具有潜在的可能性，这对射频信号分辨率，基带数字处理能力也将相应提出更高的要求。

5G 毫米波的复杂性和技术难度也体现在终端上。首先是需要引入多天线模块。一方面，5G 毫米波波束具有很强的方向性，且覆盖范围有限。图 7 显示了三个不同位置天线模块对应的不同方向的信号强度。另一方面，手持终端的 5G 毫米波信号有可能被人体遮挡。因此，5G 毫米波天线模块的设计，需要保证手机不论方向和手持位置，都能得到不同天线模块的有效覆盖，在发送和接收期间保持足够的链路裕量。

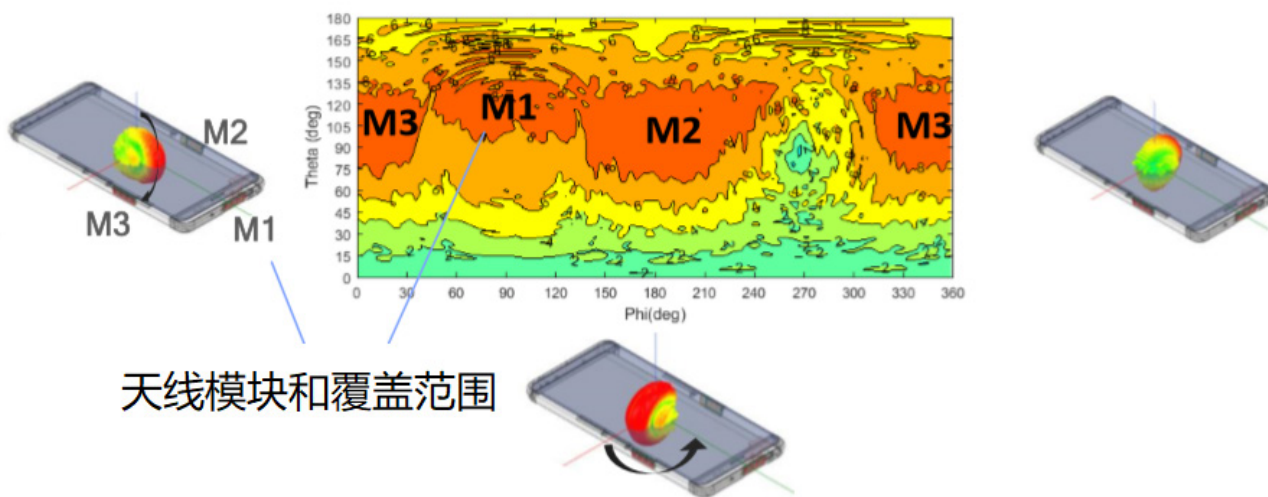


图 7 5G 毫米波天线的覆盖范围

解决这个问题主要方法是在 5G 毫米波终端实现多天线模块，这样能提高 5G 毫米波通信的鲁棒性。比如在手持终端时，个别天线模块在通信时出现被人体遮挡的情况，此时通过激活手机上的另一个天线模块就可以快速发现并切换到一条新的传输路径上，从而保证无线链接的稳定。

其次是 5G 毫米波天线设计比较困难。5G 毫米波时代，手机天线数量增多，但在天线数量增加同时，手机留给天线的布局空间却越来越小。这主要是由手机的发展和设计趋势所导致的。首先，5G 手机为了和 5G 网络能提供的多媒体业务匹配，屏幕普遍占比高，出现了全屏甚至正反双屏的设计，因而留给安装天线的位置越来越小。其次，安装在手机上的摄像头也越来越多，电池容量越来越大，天线的布局空间受到进一步挤压。另外，5G 手机普遍支持多模通信，5G 毫米波天线还需要与 4G LTE 以及 5G 中低频天线共存，甚至空间共享。同时，毫米波传输损耗高和器件加工精度高，对天线的布署和生产提出了很高的要求。这些限制形成了 5G 毫米波天线的设计挑战。

为了应对这些挑战，5G 毫米波天线提出了 AiP（Antenna in Package）方案，基于封装材料与工艺，将天线、射频收发器和射频前端集成在封装内，实现系统级无线功能的技术。AiP 技术顺应了硅基半导体工艺集成度提高的趋势，同时兼顾了天线性能、成本及体积。

第三是 5G 毫米波射频模块集成以及低功耗设计。5G 毫米波设备相关的关键器件主要包括基带芯片、高频滤波器、高频功率放大器和高频天线，以及集成了功率放大功能和幅相控制功能的其他 5G 毫米波前端芯片等。相较于中低频段，5G 毫米波天线射频设计制造需要考虑小型化、轻量化、宽带化、固态化和集成化的特点，还需考虑规模化量产和低成本等一系列问题，这对工艺要求、器件芯片集成、封装产生了更高的要求，以便最大限度地减少功耗，最大限度地提高手机续航时间。

为了扩展 5G 毫米波覆盖范围，终端 EIRP 需要尽量提高，但会因此带来功耗上升、成本上升等问题，从而影响终端的尺寸和发售价格，影响 5G 毫米波终端的普及。目前，部分商用的 5G 毫米波天线模组已经可以应对这些 5G 毫米波终端的巨大挑战。部分 5G 商用芯片已经集成了 5G 新空口无线电收发器、电源管理 IC、射频前端组件和相控天线阵列，并可在 24.25-27.5GHz（n258）、26.5 - 29.5 GHz（n257）以及完整的 27.5 - 28.35 GHz（n261）和 37 - 40 GHz（n260）毫米波频段上支持高达 800MHz 的带宽。先进工艺可将所有这些功能集成于紧凑的封装尺寸中，从而支持打造更纤薄、更时尚且兼具 5G 毫米波新空口超高速率的移动终端，通过 5G 毫米波网络提供光纤般的网络速度和低时延服务，助力开启新一代联网应用和体验。

4 5G 毫米波的测试

5G 毫米波面临的第四个挑战是**测试**。由于 5G 毫米波系统带宽大、天线阵列小、发射波束窄、传播损耗大，无法通过传统的方式进行测试，需要提高测试效率和测试精度，并缩短测试时长。例如由于射频线缆的损耗与频率成正比，因此对于高频通信，射频收发信机阵列与天线阵列间的连接的射频线缆会产生较大的损耗，从而影响设备性能，为了避免上述损耗，需要设计将收发信机阵列与天线阵列整合为一个整体的有源天线系统（AAS, Active Antenna System）。由于 5G 毫米波基站的高度密封性，无法基于传统的传导口进行测试，需要引入 OTA 射频要求和测试方法。经过多年的探索，工业界对于使用 OTA 方法测试 AAS 指标的挑战有了深入的认识，并在 Rel-15 阶段完了 5G 毫米波基站 OTA 测试方法的标准制定工作。

OTA 测试场地方案一般有 3 种：尺寸巨大、成本非常高的远场测试；尺寸较大和成本较高的近场测试；以及尺寸较小的紧缩场。由于在建设成本和传输损耗方面的优势，行业内基本认可将紧缩场测试做为 5G 毫米波 OTA 测试方案的主流方案。紧缩场是一种利用反射面设备将球面波在近距离转换为平面波，近距离实现远场测试性能的方法，原来多用于雷达天线和雷达目标散射特性测量，现在被引入民用无线通信测量。5G 毫米波基站的 OTA 测试系统，除了测试场地、仪表、转台等硬件环境外建设外，需要配套能够自动控制转台进行全球面辐射功率测试以及接口数据处理的自动化测试平台。

目前 5G 毫米波的 OTA 射频指标测试方案已经取得了较多进展，但是仍存在一些尚未解决的问题：比如基站测试需要测试高低温条件下的性能指标，紧缩场测试环境却要求恒温恒湿，存在现有测试条件与测试要求矛盾的问题；测试耗时较长；测试的不确定度问题等。目前行业内相关机构和厂商都在该围绕上述技术方向和问题进行探索研究和解决推动。例如中兴公司提出了 ROSE（Rayleigh Optimal Sampling Element）方案：瑞利最优采样和归一化波矢空间采样，被纳入 3GPP 标准。紧缩场 ROSE 测试系统采用小型紧缩场测试方案，支持 3GPP 规定的 5G 毫米波基站带内和带外射频指标的自动化测试，该测试系统解决了 5G 多天线系统测试中的关键问题，实现了 5G 毫米波基站的精确、快速、低成本的射频指标测试，效率提升 300 倍以上。

考虑到天线阵元数量增加、最小化器件内衰减、降低成本等需求，5G 毫米波终端设备也都采用了高度集成化的实现方式，将射频收发链路直接与天线阵列集成在一起，因此终端不再有射频连接口，从而无法进行传统的传导测试，也同样需要采用 OTA 测试方案。对于终端设备，3GPP 首先在 Rel-15 完成了 5G 毫米波终端测试方法的研究，该研究针对 5G 毫米波终端的射频性能、解调性能以及无线资源管理性能的测试验证制定了详细的解决方案，测量的方法包括了直接远场、紧缩场、近场转换远场。为了评估毫米波 MIMO 性能，3GPP 在 Rel-16 对 5G 毫米

波 MIMO OTA 测试方法开展了研究工作，针对静态测试环境，完成了场景定义、信道建模、测试方法的标准制定工作。

虽然 Rel-15、Rel-16 制定的测试方法能够对 5G 毫米波终端的基本性能进行验证，但是仍然有如下问题与挑战：无法支持需要较高下行信号功率或者较低上行信号功率的测试例；无法支持如 FR2+FR2 Inter-band CA 等

先进技术的测试；单极化接收机的测试设备无法准确测量上行调制相关的指标；静态的测试环境使得波束管理算法没有得到很好的验证；不支持极端测试条件的测试；测试时间过长等。3GPP 将在 Rel-17 对上述问题与挑战继续进行研究，以进一步完善 5G 毫米波终端测试解决方案。

5 5G 毫米波与中低频的共存

5G 毫米波面临的第五个挑战是**与中低频的共存**。5G 毫米波的商用很可能是一个渐进的过程，例如先解决补盲补热、行业应用以及必要的无线回传场景；然后逐步在密集城区、一线城市全面铺开，逐步提升渗透率，提供大多数场景的高速宽带接入。由于短期内 5G 毫米波部署很难实现连续无缝覆盖，所以与 Sub-6 GHz 共存的问题，尤其是协同的网络规划、灵活的业务负载分担和高低频的切换与互操作体验等方面都非常重要。目前的主流的技术路线是 DC 和 CA。相对来讲 DC 的方式更易实现，终端支持难度稍低，而 CA 的方式效率更高，实现更深层级的协同。因此，如果仅仅是增加容量的热点区域，使用 DC 就可以满足要求。面向长期演进，且对下行覆盖连续性有一定要求，可以考虑使用 CA 方案。

5G 毫米波与 Sub-6 GHz 的共存的另一个技术挑战是 5G 毫米波与 5G Sub-6 GHz 在载

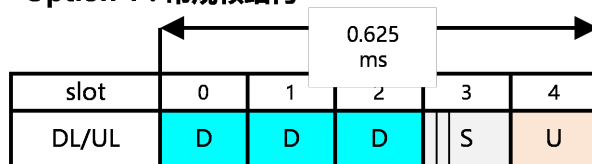
波聚合场景下的同步问题。由于通信器件的硬件差别，5G 毫米波与 5G Sub-6 GHz 载波的定时很容易出现误差，导致载波聚合系统的同步出现问题。目前，3GPP 标准已针对非同步的载波聚合系统带来的问题进行优化。

另外，在 5G 通信系统中，5G 中低频和 5G 毫米波基站通常会出现同站共存，终端也会同时支持 5G 中低频和 5G 毫米波网络。不同系统共存的物理限制，比如空间限制，散热等，也是毫米波与 Sub-6 GHz 系统共存的技术挑战之一。比如，5G 终端既需要支持 5G 网络上的毫米波信号，也需要支持 5G 中低频信号。然而，中低频信号传输较长波长，与 5G 毫米波无法使用一个天线覆盖，因此，为了 5G 中低频和 5G 毫米波的共存，终端需要安装多组不同功能的天线。而如何放置 5G 天线，使其适合移动设备，平衡有限的物理空间和保证不同信号的覆盖需求，又不影响彼此的性能，成为新的设计挑战。

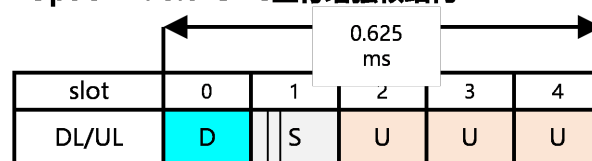
6 5G 毫米波灵活空口实现

5G 毫米波面临的第六个挑战是灵活空口实现问题。未来不断涌现的行业应用对业务的需求具有较大差异，比如视频监控、移动警务机器人、远程手术等需要大上行速率保障，4K/8K、VR/AR 视频则需要大下行速率保障，但目前 5G 毫米波技术的空口上下行能力不均衡，无法完全满足灵活部署需求。对此，中国联通提出 5G 毫米波灵活帧结构的方案，通过在系统中采用三种帧结构，并根据业务需求进行灵活调配，从而满足业务差异化需求。如图 8 所示，其中以 DDSU 帧结构适合大下行业务；DSUUU 适合大上行业务，相对于 DDSU 上行可提高至 2.5 倍以上的峰值速率；DDSUU 适合上下行均衡的业务，上下行传输速率比例约为 1:1。

Option 1 : 常规帧结构



Option 2: 0.625ms上行增强帧结构



Option 3 : 0.625ms上行增强帧结构



图 8 5G 毫米波灵活帧结构满足不同业务的差异化需求

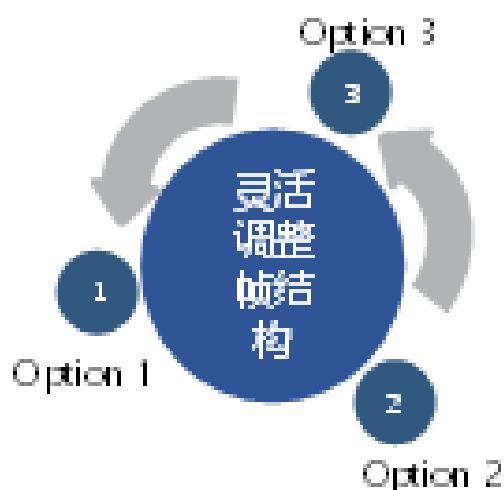


图 9 5G 毫米波灵活帧结构调整方案

此外，如图 9 所示，通过灵活帧结构自适应调整方案可以带来三方面的优势：一是可根据覆盖区域的长时间业务情况进行预测调整；二是根据 5G 行业应用的突发性情况进行上下行帧结构快速调整；三是满足 5G 行业应用需求，也可以有效面对演唱会、体育场馆等对上行带宽突发需求明显的公网场景。因此 5G 毫米波采用灵活帧结构的方案可以覆盖多种场景、多种业务的变化，更高效发挥 5G 毫米波大带宽的优势。



4

5G 毫米波的应用场景和成功案例

5G 毫米波的应用场景和成功案例

综合 5G 毫米波的优势和不足，其应用场景主要可以分为以下三类：

1 室内外交交通枢纽、场馆等热点

5G 毫米波通过运用大规模天线阵列技术，通过波束赋形、波束扫描、波束切换等技术补偿毫米波频段带来的额外传播损耗，使 5G 毫米波基站能够用于室外蜂窝移动通信。

^[12] 室外典型的热点区域有室外广场、体育场、音乐厅、核心主干道等，室内的典型热点区域有机场、火车站等交通枢纽和体育馆、购物中心等。这些热点区域的特点是用户数多，高峰时间内对数据业务量需求极大。在品牌价值区域，可以通过部署 5G 毫米波，提供超高质量服务，以提升品牌价值；在高流量区域，可以通过部署 5G 毫米波进行精准覆盖分流，解决热点流量问题。

如室外广场，会有大量人群聚聚活动，会存在社交媒体下载和视频、图片上传等大量通信行为，因此对上下行的数据传输速率要求极高。而室外广场一般较为空旷，较高的建

筑较少，基本上是视距传播，因此可以在广场四周部署 5G 毫米波基站进行覆盖。重要交通枢纽场景由于客流量大，站台停留时间短，因此对短时突发类数据业务需求和系统容量需求都较高。在此类场景下，5G 毫米波技术可以充分发挥其带宽大、瞬时速率高、系统容量大的优势，为大量快速进出的用户提供高效的 5G 网络接入。而体育场和体育馆具有人群量大、用户数集中等特点，如举办大型音乐会时体育场中心会聚集大量人群，举办体育赛事时观众席上会有很多观众，由于用户数量较为密集、环境比较空旷，信号传播路径又多为视距传播（遮挡少、信号衰耗小），有利于规避 5G 毫米波的空间传播劣势，而充分发挥其系统带宽大、业务速率高、系统容量大的优势，在大型活动和体育赛事期间，为大量现场观众提供高质量的 5G 网络服务。

【12】 中国电信 5G 技术白皮书，中国电信，2018 年 6 月。

案例 1：中国某大型地铁站的 5G 毫米波覆盖仿真

本案例^[13]选取了中国某超一线城市内的一个大型地铁站的站台区域，总面积约为 1900 平方米。假定在站内实际已部署的 13 个 WiFi 系统接入点布放 5G 毫米波基站，使用 128x2 天线阵列，仿真得到 28GHz 频段 5G 毫米波信号覆盖情况如图 10 所示。

仿真结果显示，96% 的站台区域均可满足 5G 网络设计下行覆盖目标（0.4bps/Hz）。

当给定系统带宽为 800MHz，TDD 上下行时隙配比为 1:7 时，仿真得到的单用户瞬时突发数据速率的统计中位值可高达 4.6Gbps。这一仿真结果充分表明对地铁站这样的交通枢纽场景，5G 毫米波部署通过重用已有 WiFi 或 4G 室内分布接入点位置，无需增加新的布点，就可以达到极佳的 5G 信号覆盖质量和数据服务效果。

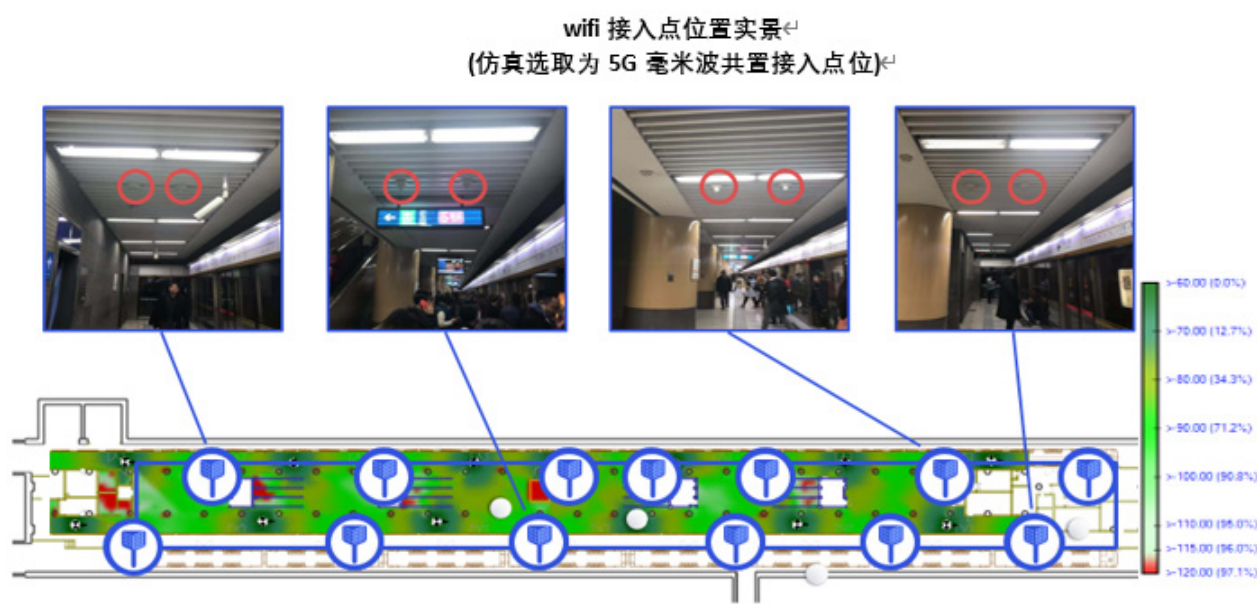


图 10 某地铁站站台区域 5G 毫米波覆盖仿真信号分布

【13】 5G NR mmWave outdoor and indoor deployment strategy, 2019 年 5 月, <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/deploying-5g-nr-mmwave-for-indoor-outdoor.pdf>

案例 2：美国 Super Bowl 体育馆的 5G 毫米波网络

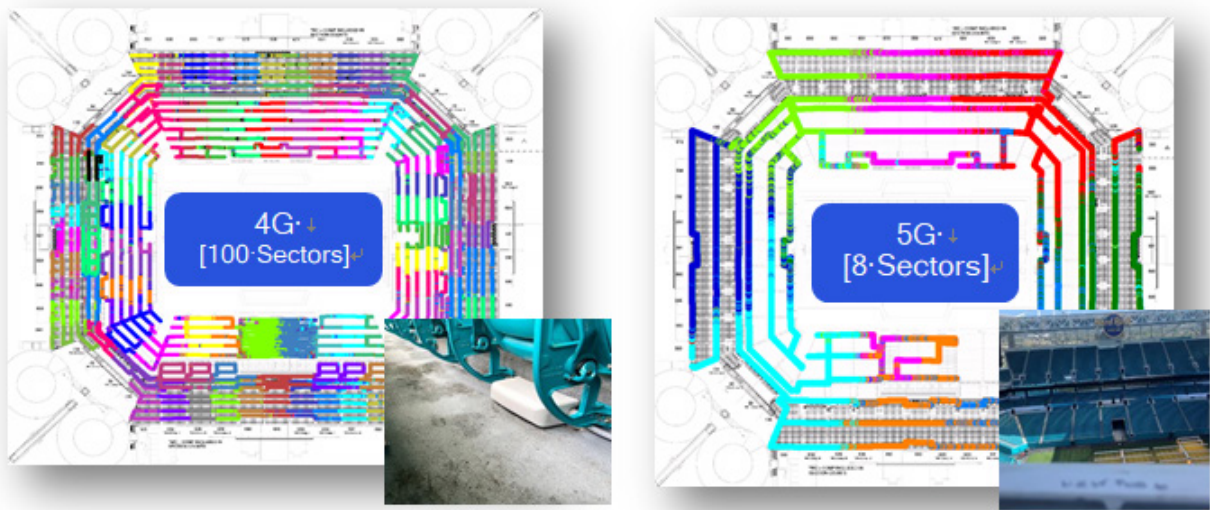


图 11 看台区 4G 和 5G 毫米波部署后信号情况

在美国超级碗（Super Bowl）体育馆内实际部署了 8 个 28GHz 频段、系统带宽为 400MHz 的 5G 毫米波基站设备，其布放位置使得信号到达场馆内观众席座位区的传播路径均为视距传播。场馆内还布放了 100 个 4G LTE 基站设备。图 11 是部署完成后实测的 4G 和 5G 每扇区信号覆盖范围（以不同颜色表示不同扇区信号覆盖点位）。

5G 毫米波信号强度（SS-RSRP）实测结果以及 4G 和 5G 毫米波下载速率对比测试结果如图 12 所示。可以看到，在看台座位区域，仅由 8 个 5G 毫米波基站就能对 Super Bowl 体育馆进行良好覆盖，5G 毫米波数据下载速率实测达到了 915Mbps，远远超出了 4G 的 98Mbps。（注：未来随着 5G 终端的增加和数据业务需求量的上升，考虑到并发用户数的问题，有可能需要增加 5G 毫米波基站。）

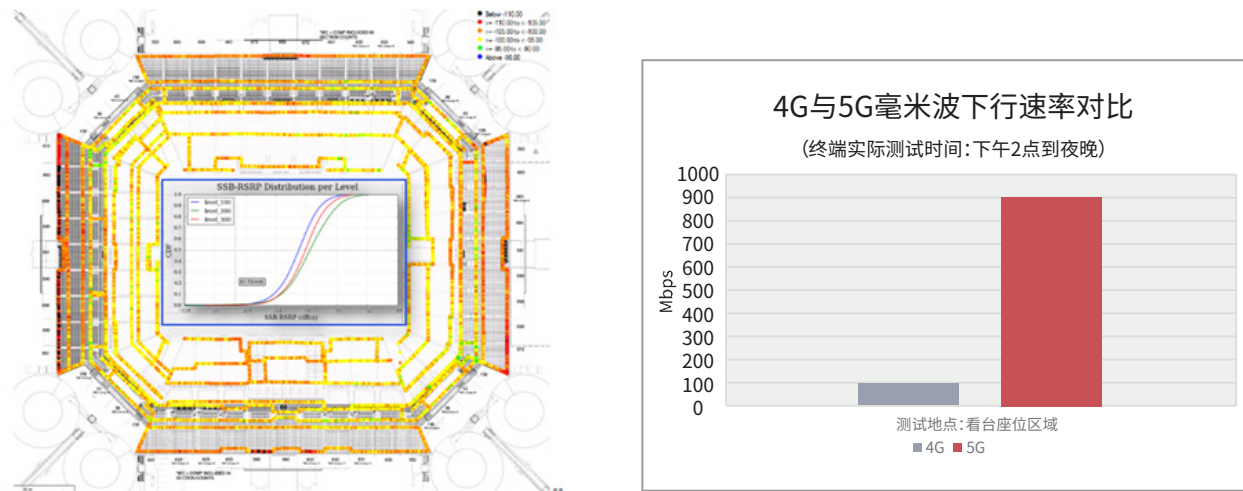
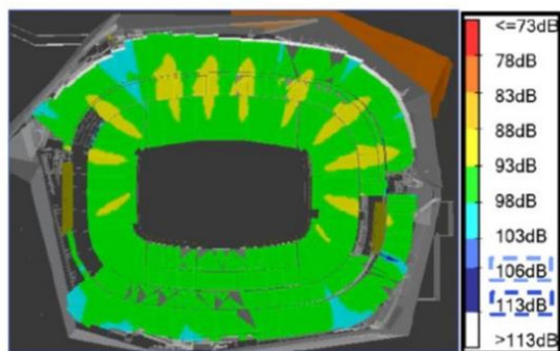


图 12 5G 毫米波部署后信号实测结果以及 4G 与 5G 毫米波下载速率对比测试结果

案例 3：明尼阿波利斯 U.S. Bank 体育馆的 5G 毫米波网络

美国明尼阿波利斯 U.S. Bank 体育馆，座位容量约为 67,000。为了满足超大型赛事期间的超高速无线容量需求，运营商与诺基亚在此实际部署了 28GHz 频段 5G 毫米波基站设备，通过 16 个小区为 100% 的座位提供了毫米波信号覆盖 ($>-103\text{dB}$)。图 13 是 U.S. Bank 体育馆 5G 毫米波信号实际覆盖情况。

从场馆内多点位的测速数据（图 14）可以看出，5G 毫米波可提供了 1000Mbps 以上的体验速率，对于赛事直播、高速上网、VR/AR 等等 5G 用例提供了远超于 LTE 的系统容量。



座位容量：约67,000

- 覆盖：100% 区域 $> -103\text{ dB}$
- 速率：1.0 - 1.5 Gbps (@ 400 MHz)



图 13 U.S. Bank 体育馆 5G 毫米波部署情况

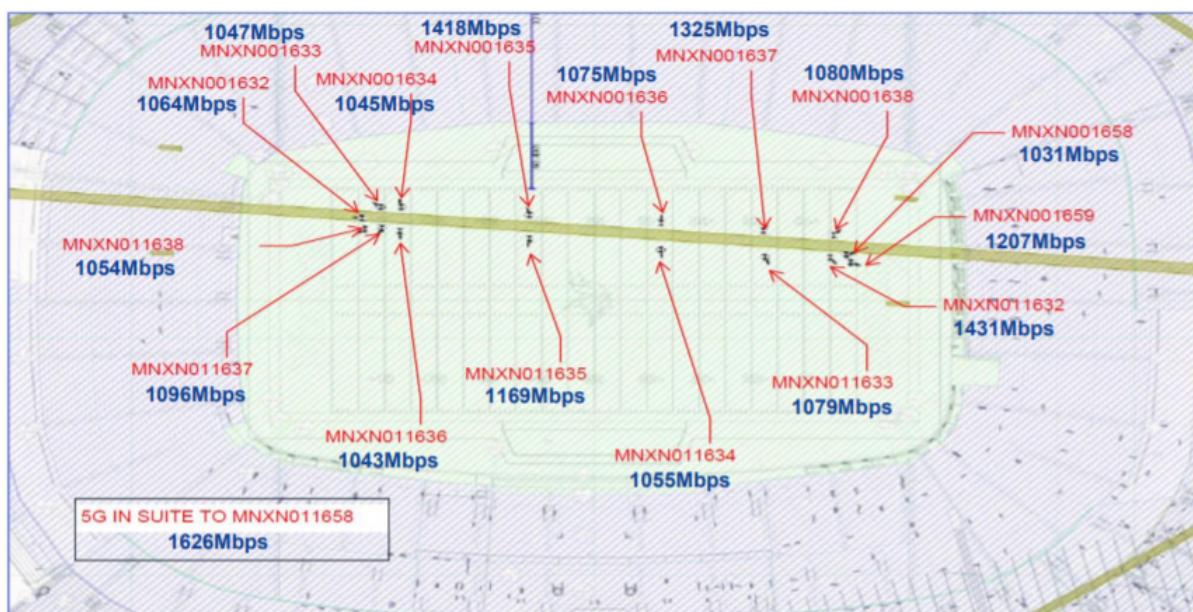


图 14 U.S. Bank 体育馆 5G 毫米波信号多点位测速情况

案例 4：芝加哥城区 5G 毫米波网络的覆盖情况

如图 15 所示，某运营商与诺基亚在芝加哥城区业务热点地区，商用部署了 28GHz 毫米波应用。毫米波对于街区、户外、开放区域可以提供良好的覆盖，在密集城区视距场景下可达约 500 米。对于非视距场景，例如

街道拐角 10 米外，实测 >14dB 的传播损耗；街道拐角 50 米外实测 >21dB 传播损耗。对于石灰、砖墙、窗户等类型建筑材料可产生 20-50dB 的传播损耗，因此基本不考虑毫米波波段室外覆盖室内的场景。

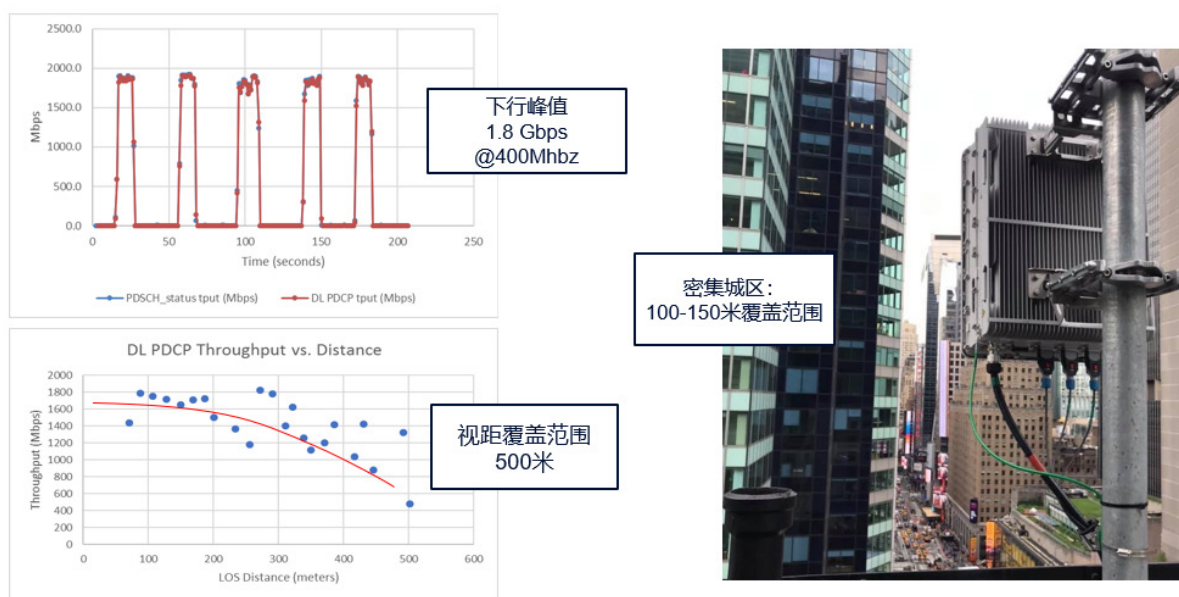


图 15 芝加哥城区毫米波商用覆盖情况

【小贴士：中国联通将在 2022 年冬奥会应用 5G 毫米波】

作为 2022 冬奥会运营商合作伙伴，中国联通提出 3 大智慧场景、服务 6 类人群的智慧冬奥应用方案。中国联通将综合应用 5G 毫米波等多种技术手段，打造超大带宽无线场馆，针对冬奥中的观赛、参赛、办赛三大应用场景，创新智慧观赛、智慧场馆等多项业务应用，全方位支撑科技冬奥各项工作，并更好地向观众、媒体转播者、赛事组织者和运动员 / 裁判员等提供优质的观赛体验和完备的服务保障。

北京冬奥会各场馆各项赛事面临大量超高清视频的直播需求，需要支持大带宽的上行回传需求。一个业务场景是实时直播视频的回传，要求网络必须把多路高清视频信号可通过云端第一时间无损回传，满足及时、高效、安全地获得奥运赛事片段及图像的需求，使媒体视频节目可实现全云端的采集、编辑、播发。这就需要改变以往赛事转播模式，为奥运带来更多创新的可能性。另一个业务场景是代替光纤等有线传输，使在那些无法布放缆线的赛道和室外赛场架设的摄像机可借助高带宽和高速率的 5G 网络回传视频信息。5G 毫米波作为极致 5G 体验的选择，可被应用于实时视频采编、全息访谈、AR/VR 的新视觉观赛服务，以及多视角、360 度的移动无线视频采集和视频监控与安保识别业务，同时服务现场的工作人员、观众以及媒体从业人员的数据传送。

2 行业应用（特别是工业互联网）

5G 毫米波的行业应用主要是针对大带宽低时延业务、即插即用、以及有移动性等要求的业务接入，例如移动视频监控、工业视觉、AGV、无人机控制与图传、协作机器人生产线控制等业务对带宽和时延的要求都非常高，只有 5G 毫米波才能够很好的满足相应的需求，实现工业

的智能化和网络互连。5G 毫米波还可以与行业专网相结合，赋能运营商为行业提供区别于公网频点的灵活带宽专网服务；将 5G 毫米波与 MEC、AI 技术结合，能够为覆盖区域提供“大容量高速率+本地化”的智能解决方案，为覆盖区域提供定制化的园区专网服务。

【小贴士：5G 毫米波在工业互联网中的应用】

工业互联网通过新一代网络平台把设备、生产线和工厂等紧密地连接融合起来，形成跨设备、跨系统、跨厂区、跨地区的互联互通，从而提高效率，推动整个制造服务体系智能化，使工业经济各种要素资源能够高效共享。基于 5G 毫米波频谱里更大的带宽，工业自动化的广泛实施将受益于额外的容量，5G 毫米波将支持传送每个自动机器人产生 / 接受的大量数据，并支持这些自动化机器人的大规模密集部署。与此同时，工业互联网在应用环境、时延、精准定位等多方面都对 5G 的发展应用提出了挑战，并更多的从更多维度组合方面提出要求，比如同时要求高吞吐量、高连接密度、高连接利用率或者高可靠率等。典型的工业机器人网络会同时要求 1 毫秒时延和 99.9999% 的连接可用率；工业手持设备和监控摄像头等则不仅要求能够支持更高的清晰度和帧率，而且实际生产所需的设备密度非常大。因此在工业互联网场景下，5G 毫米波技术是不可或缺的。

首先，5G 毫米波超大带宽可以满足大量数据（如产线视频监控）传输的需要；其次，5G 毫米波带来超低空口时延，满足工业级应用（如机械臂控制）的极低延迟要求；第三，5G 毫米波波束高度定向的特点适合提供高密度部署，提升频谱空间复用率，满足工业互联网要求的高连接密度；第四，5G 毫米波能够满足对部署环境的严格限制，并提高通信过程的安全性、减小监听可能，强化数据安全；第五，5G 毫米波的超高时间分辨率和超高空间分辨率能够实现高精度（有望达到厘米级）实时定位，从而适应工业互联网多样化的需求。

在工业互联网上，5G 毫米波的典型应用包括远程控制系统、工业机器人、远程监控和质量控制、自主工厂运输等，如图 16 所示。

远程控制系统 	可以实施远程对象监控和操纵，以提高效率并改善智能工厂的安全性。通过远程操作工厂设备，可以使涉及挥发性化学物质或温度敏感材料的工业流程更安全。通过允许远程操作员基于对中央控制站的实时反馈停止、减速或加速任何互联机器，也可以提高效率。
工业机器人 	通过工业机器人技术，智能工厂中的每台机械几乎都能立即响应请求和指令，从而在生产中快速做出响应，以满足需求的实时变化。这也使得制造产品的定制有可能达到前所未有的规模。这些互联设备之间的通信也可以提高效率。
远程监控和质量控制 	实时数据收集和分析，特别是诸如高速成像以及虚拟和增强现实应用之类的数据密集型流程，可以通过以下方式提高产量并提供在职培训： · 员工可以在工厂车间查看实时数据，并将有缺陷的机器图像与工作订单中的图像进行比较； · 通过虚拟模拟对新员工进行培训； · 顾问/专家不在现场时可以提供远程协助，或者为工人提供自动化的流程，使他们可以独立于专家进行故障排除。
自主工厂运输 	与更广泛的运输环境类似，工厂环境中的无人驾驶汽车（例如，手推车、起重机等）可以与中央控制或监控中心以及工厂内的其他机器、设备、对象，以及其他更广泛的基础设施进行通信。

图 16 5G 毫米波在工业互联网中的应用

案例 5：爱立信与奥迪公司将 5G 毫米波应用于工业互联网

随着制造业的迅速发展，奥迪（Audi）等行业领导者正在寻找方法，在提高生产自动化和装配流程灵活性的同时，也降低人员安全风险，从而使工厂保持领先地位。5G URLLC 包括 5G 最强大的功能，可在各种数据速率下实现超高可靠性和 / 或超低延迟通信，即使在负载很重的网络中也可以在规定的延迟范围内以所需的性能和可靠性传输数据，从而满足关键物联网应用需求。具有可靠性、延迟和数据速率要求组合的典型用例包括 AR/VR、自主车辆、移动机器人、实时

人机协作、云机器人、触觉反馈、实时故障预防以及机器和过程的协调和控制。

爱立信和奥迪一直在合作，以 5G 技术拓展未来工厂的视野。继 2018 年 8 月首次宣布合作开创 5G 在汽车制造业中的应用，以及之前与奥迪（Audi）和希克（SICK）的合作之后，通过基于 5G 毫米波的 5G URLLC 通信能力，在 5G 网络上支持 AGV 安全运营（如图 17 所示），将无线网络上的工厂自动化提升到一个新的水平。



图 17 5G 毫米波支持 AGV 运行

利用 5G URLLC 运行 PROFINET RT 和 PROFIsafe 等自动化通信的行业标准和协议，提供非常低的延迟和严格的延迟限制，并具有所需的保证级别，以避免触发系统中的安全停止。这对工业自动化行业具有重要意义，因为它

为安全的人机交互打开了大门，而这在之前只能通过有线网络实现。切断电缆是实现工业 4.0 真正的游戏规则改变者。这证明了 5G 作为一种面向未来的通信技术的潜力，能够满足汽车生产的高要求。

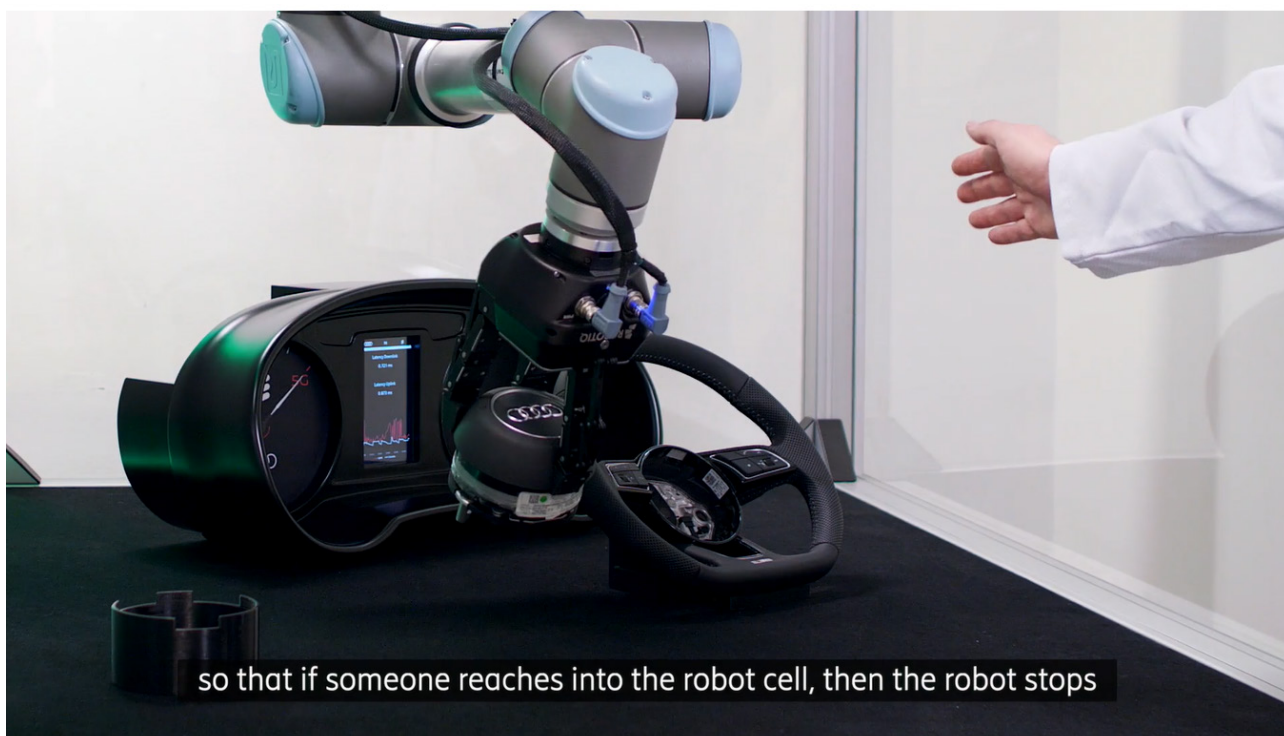


图 18 5G 毫米波 URLLC 能力演示

爱立信和奥迪于 2020 年 1 月在基斯塔的爱立信工厂实验室成功地测试了基于 5G 毫米波的 5G URLLC 功能和实际工业自动化应用。在展示 5G URLLC 强大功能的最新演示中，爱立信和奥迪还共同构建了一个机器人单元，与当前奥迪工厂内其他机器人单元一样，只是通过 5G 毫米波进行连接。机器人的手臂正在制造方向盘（如图 18，正在安装一个安全气囊），而激光幕则保护着机器人单元的开口侧。由于 5G URLLC 的超低延迟和可靠性，如果工厂工人伸手进来，机器人将立即停止工作，使工作人员在操作机器时不会受到伤害。这种保证可靠性的即时响应在传统 Wi-Fi 或上一代移动网络中是不可能实现的。

将自动化机器从电线中解放出来，大大提高了生产线的灵活性、机动性和效率，因为使用有线网络连接的机器人单元在工厂地板上的放置位置受到限制。有了基于 5G 毫米波的 5G URLLC，这些机器只需要一个电源连接，通常在工厂的任何地方都可以使用，这意味着生产设置可以很容易地更改，并且可以在日常基础上移动设备，以最大限度地提高效率。

3 家庭和写字楼的无线宽带接入（FWA）

5G 毫米波频点较高、波长较短，可以在相同面积实现更多天线阵列布放、波束能量更集中；并且 5G 毫米波系统可以提供高达 800MHz 频宽、数 Gbps 的系统峰值速率，使 5G 毫米波可以作为无线回传链路，解决一些场景无法布放光纤或布放光纤代价过高

的问题，作为最后一公里常规接入手段的补充。5G 毫米波可作为 LTE\5G 中低频基站的回传，或者通过 5G 毫米波 CPE 为家庭或企业提供宽带服务，提供家庭和写字楼的无线宽带接入，实现对高清视频、AR/VR 等业务的良好支持。

案例 6：南美洲某大城市密集城区家庭无线宽带接入仿真

在南美洲某大城市密集城区 2 平方公里区域，进行 5G 毫米波 CPE 部署覆盖仿真。整个仿真区域内共 2561 栋楼宇，平均建筑物

高度约为 26 米。我们假定在住宅楼屋顶安装 CPE，整个仿真区域内建筑物分布和部署的 CPE 密度分布如图 19 所示。

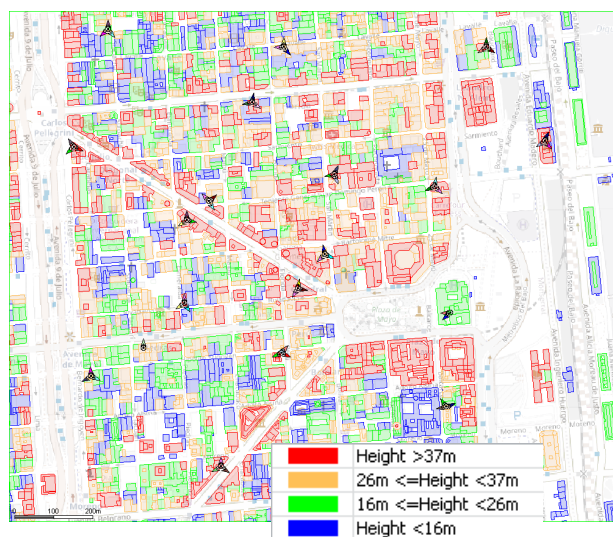


图 19 仿真区域内建筑物和 CPE 部署情况

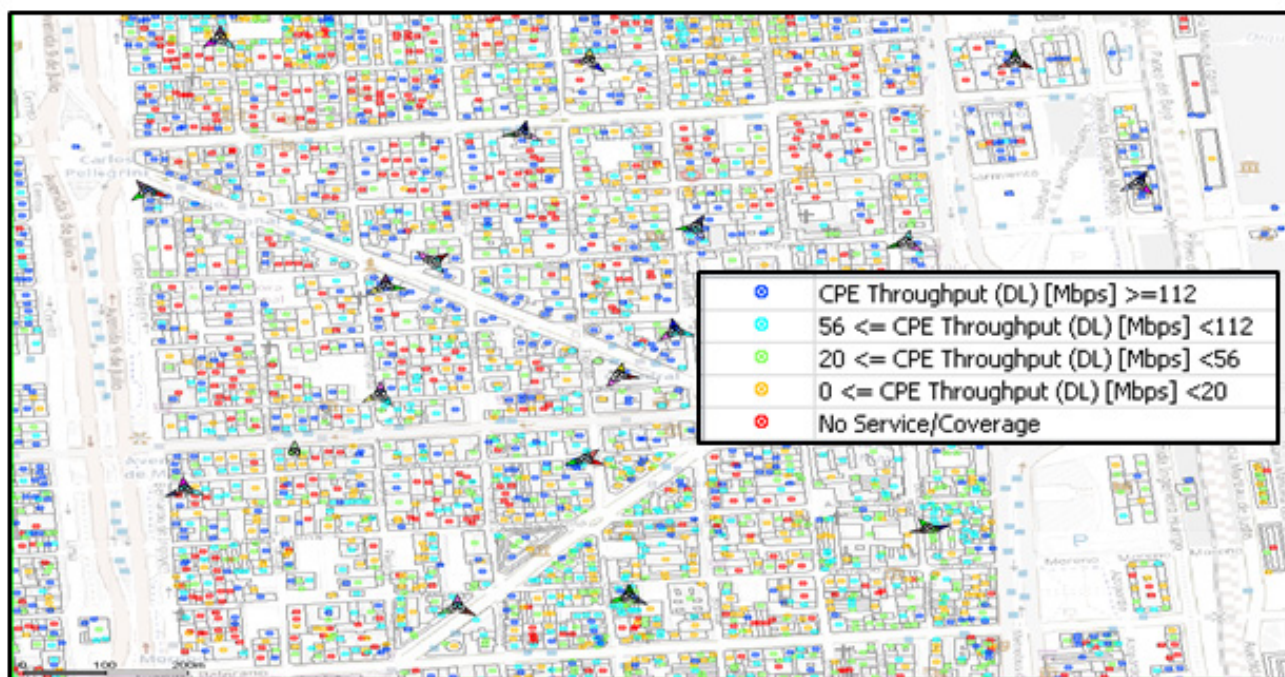


图 20 CPE 数据下载速率地理分布情况（仿真）

仿真所采用的具体方案是：根据楼宇内平均每层的住户数量及家用网络典型业务模型，并结合 5G 业务市场渗透率和业务使用率等参数，采用蒙特卡罗业务仿真模型，对 28 GHz 频段、800MHz 系统带宽、TDD 上下行时隙配比为 1: 3 配置下的 5G 毫米波数据业务性能进行仿真。仿真区域内共布置了 57 个 5G 毫米波扇区（与现网实际部署的 LTE 基站共站址），平均每扇区内发生有效业务连接的 CPE 个数为 27 个（与仿真使用的业务激活模型有关）。从仿真结果来看，最终实现了 85% 区域面积的 5G 毫米波有效覆盖。在对 15000+ 住户的仿真结果进行统计后可以得到，平均每户数据下载速率的中值为 159Mbps，最高值可达 1.95Gbps 以上，地理分布详情如图 20 所示。

案例 7：企业办公楼无线宽带接入试验

(1) 仿真案例：本案例^[13]选取了某企业真实办公楼内约 2500 平方米办公区域，从实际部署的 20 个 WiFi 系统接入点中选取 14 个作为 5G 毫米波网络接入点位置，假定每接入点都布放了 5G 毫米波 128x2 天线阵列，仿真得到 5G 信号覆盖情况如图 21 所示。

当设定下行系统带宽为 800MHz，TDD 上下行时隙配比为 1: 7 时，仿真结果表明，在满足面积覆盖率达到 98% 目标条件下，5G 毫米波覆盖区域内数据下载速率的统计中值可高达 4.9Gbps。

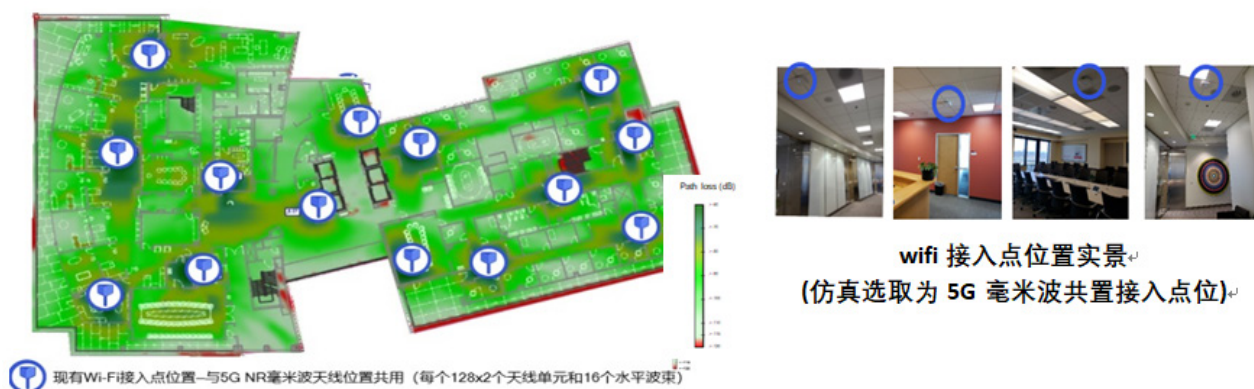


图 21 5G 毫米波接入点位置与信号覆盖强度仿真

(2) 实测案例：在某企业真实办公楼内部署一个 28 GHz 频段毫米波单扇区基站，系统带宽为 400MHz，使用商用终端在覆盖区域的视距（近点和中点）和非视距（中点和中远点）范围内分别进行了定点测试，并与 4G 的数据下载速率对比。案例场景如图 22 所示。



图 22 室内测试场景和路损分布

[13] 5G NR mmWave outdoor and indoor deployment strategy, 2019 年 5 月, <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/deploying-5g-nr-mmwave-for-indoor-outdoor.pdf>

楼内定点测试选点位置如图 23 所示。



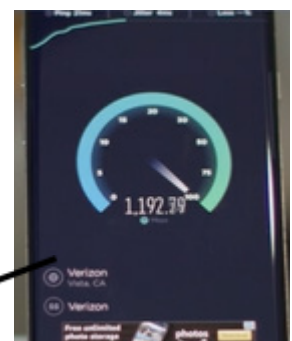
图 23 定点测试选点位置图

实测结果如表 5 所示。可以看出，几个测试点的速率差异并不显著，即便在无线传播条件较差的非视距中远点位置，5G 毫米波终端也可获

得千兆比特下载速率。该项测试结果为 5G 毫米波对于室内办公场景的良好覆盖效果提供了有力的数据证明。

表 5 5G 毫米波室内定点测试结果

测试点编号	测试点位置	4G 下载速率	5G 毫米波下载速率
1	视距近点	26 Mbps	1.55 Gbps
2	视距中点	25 Mbps	1.53 Gbps
3	非视距中点	25 Mbps	1.50 Gbps
4	非视距中远点	19 Mbps	1.09 Gbps



案例 8：农村固定无线接入测试

高通联合爱立信和 U.S Cellular 宣布，三方完成美国首次增程毫米波 5G 新空口数据呼叫。超过 5 千米的此次数据呼叫是商用网络中迄今距离最远的连接，速率超过 100 Mbps。此项成果堪称关键行业里程碑，打破 5G 毫米波仅局限于高密度部署的传统观点，表明 5G 毫米波能够助力缩小“连接鸿沟”并将宽带服务扩展至城市、城郊和农村地区，从而帮助运营商以成本高效的方式通过 5G 毫米波向学校、医院和市政厅等机构提供光纤般速度的无线网络服务，解决一些“最后一公里”挑战，尤其在农村地区。

例如，小城镇能够受益于联网社区空间，比如固定无线接入赋能的图书馆、体育馆或休闲中心。通过 5G，能够以虚拟方式向历史上可能无法接入高速网络的服务匮乏社区提供独特的演出和沉浸式学习体验。另一个例子是偏远农村地区的本地小企业。5G 固定无线接入将让小企业创业者更容易在线扩大影响力。无论在社交媒体上管理品牌、处理付款、产品履约、利用数据分析增加网站流量，还是管理第三方供应商，有稳定的高速互联网对家庭式企业或本地商店的成长壮大至关重要。通过固定无线接入，偏远地区的人们能够充分利用独特的产品满足年轻消费者对本地正宗稀有商品的需求。

此外，在农村社区，5G 固定无线接入能够变革需要持续监测大量数据的畜牧业，从日



图 24 威斯康星州 5G 毫米波固定无线接入设置

常饲养到繁殖状况。在农村地区引入光纤对中小家庭农场来说成本过高，但借助中心基站，畜棚和其他基础设施上部署的 CPE 将支持实时远程监控牲畜并通过摄像头与传感器采集和更新数据。未来小型高科技农业全都涉及实时数据，5G 能够让这些数据变得更加触手可及。

总结

5G 毫米波拥有频率资源丰富 / 带宽极大、易与波束赋形技术结合、可实现极低时延、可支持密集化部署、可进行高精度定位、集成度高这六大技术优势，能够充分释放 5G 的全部潜能，成为 5G 下一阶段重点部署的核心技术之一，是 5G 实现最初的全部承诺、达成最初的全部愿景的关键使能技术。正如高通公司中国区研发负责人徐皓所说，“5G 是中国新基建战略的重要组成部分，具备毫米波能力是完整的 5G，5G 毫米波的部署是实现 5G 全部愿景的重要步骤。”

5G 毫米波支持移动通信的技术解决方案已经基本成熟。目前 5G 毫米波产业链和标准化组织针对 5G 毫米波的各项不足提出了许多创新解决方案，如先进波束赋形和灵活波束管理技术、IAB、快速灵活的小区切换管理、波束失败快速恢复、跨频段跨制式载波聚合和双连接、宏站微站混合组网等，实现了 5G 毫米波的覆盖优化、移动性管理优化和用户体验优化，并在实践中攻克了大规模天线阵列天线管理、终端天线布局、OTA 测试等难题。

5G 毫米波适用于室内外交通枢纽 / 场馆等热点覆盖、工业互联网等行业应用、家庭 / 写字楼等无线宽带接入三大应用场景，能够满足相关业务对于大带宽、低时延、精准定位、灵活部署等方面的需求，已经形成了一批成功的应用案例。中国已经是智能制造部署方面的全球领先者，通过在制造过程中使用互联设备，其中越来越多的公司已经创造了更高的利润。在工业机器人的需求方面，中国也处于领先地位，在 2017 年就已占全球市场的 20%。^[14] 中国处于利用智能制造的有利地位，因为相对于欧洲和美洲的制造中心而言，中国相对较新的工厂更容易部署和改造工业机器人流程。5G 毫米波频谱可通过提供高容量、低时延的无线连接，为制造商提供必要的网络条件，实现远程控制系统、工业机器人、远程监控和质量控制以及自主工厂运输等工业 4.0 应用，以实现互连设备和自动流程的全部潜力。在 2022 年北京冬奥会上，5G 毫米波有望大放异彩，为观众、媒体转播者、赛事组织者和运动员 / 裁判员等提供优质的观赛体验和完备的服务保障。

【14】“中国智能制造：长期稳步推进”，德勤 (2018)，<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/energy-resources/deloitte-cn-eri-2018-china-smartmanufacturing-report-en-190403.pdf>。

目前 5G 毫米波产业链已经具备商用能力，日益发展的 5G 毫米波设备生态系统已经可以支撑在中国的商用。在 2020 年 8 月 GSMA 开展的调查中，80% 的受访企业认为 2022 年底之前中国将进行 5G 毫米波的部署，60% 的受访企业认为 2025 年底之前 5G 毫米波几乎肯定成为中国 5G 的主要组成部分之一（另外 40% 的受访企业认为 2025 年底之前 5G 毫米波有较高可能成为中国 5G 的主要组成部分之一）。同时，受访企业普遍表示，5G 毫米波在中国的商用需要进一步的政策支持和产业的协同发展。特别是需要统筹考虑移动通信产业的发展，适时分配商用 5G 毫米波频谱。频谱发放将会决定 5G 毫米波应用部署的时间节点，进而影响 5G 毫米波部署的节奏和规模。5G 毫米波和 Sub-6 GHz 频谱由运营商统一建设可以提高频谱资源的使用效率，保证 5G 产业的完整性，将 5G 做大做强，同时由于运营商在频谱规划、部署、运营、应用方面具有多年经验和优势，可以做到有效的协调，并降低频谱干扰的可能性，保障频谱安全。受访企业认为，运营商及相关政府组织需要领导产业各方大力推动关键技术研究、标准体系构建、产品化进程、业务示范和产业链合作，推动更多的 5G 毫米波供应链企业参与到创新和研发当中，提供有竞争力的产品和高带宽的新应用业务开拓；积极探索 5G 毫米波在垂直行业和典型场景下的应用试点，积极推进 5G 毫米波要求进入终端基本上市要求，

[9] 3GPP TR38.901, https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.901/38901-g10.zip

为规模应用做好充分准备，并以 2022 年冬奥会为重要契机推动 5G 毫米波在中国的商用部署。运营商在 5G 毫米波产业链中处于最终用户和网络运营者的重要角色。在产业链发展缓慢的情况下，移动通信行业在等待运营商发布明确信号。目前国内 5G 毫米波相关研究还比较分散，尚未形成明确的 5G 毫米波移动通信系统应用方向和部署方案。运营商在目前能够发挥重要作用，例如发布 5G 毫米波技术指引（如中国联通发布了 5G 毫米波技术白皮书^[9]），积极开展 5G 毫米波试点应用，引导 5G 毫米波标准制定和设备研发方向，推动 5G 毫米波产业链的进一步成熟化。

目前 5G 毫米波的发展可以说是机遇与挑战并存。在机遇方面，5G 毫米波产业将伴随新基建建设快速发展。同时，5G 毫米波发展还面临着一些挑战，中国 5G 毫米波产业链整体上略微落后于美、日、韩等国家，在关键技术、核心器件和芯片等多方面有待完善和提高，国际间合作将有助于互相取长补短。然而中国发展 5G 毫米波仍有政策支持力度大、实际应用场景多、市场空间大、行业应用需求多等多个优势，网络侧和终端侧的产品化进度也基本和国际同步，在商用频率规划出台、发展速度加快后，仍有望进入第一梯队，继续引领 5G 的发展。新的用例将推动 5G 毫米波的发展并助力该技术带来巨大的社会效益。鉴于制造业在中国经济中的主导地位，利用 5G 毫米波的工业应用将为中国提供推动经济增长的绝佳机会。

未来 5G 毫米波的技术和产品演进主要有以下几个方向：

- 推动 5G 毫米波高频器件产业化发展。高频器件的能力指标决定了 5G 毫米波系统的设备能力和系统的功耗能效，高频器件的产业化成熟度决定了 5G 毫米波系统的设备成本，对未来的部署方案和落地应用产生重要影响。需要产业界汇聚产学研用力量共同推进高频模拟器件的产业发展，打造成熟的高频段射频器件与芯片产业链。
- 完善 5G 毫米波测试方案。5G 毫米波基站设备 OTA 射频指标标准化趋于成熟的同时，指标测试方案的可行性、可靠性、准确性、成本和效率等都面临新的问题和挑战。测试场地成本、测试效率以及测试准确度等都是 OTA 测试方案需要考虑并给出解决方案的问题。目前行业内相关机构和厂商都在该围绕该技术方向进行探索研究，需要整个产业界从测试环境、仪表器件和算法设计等多方面共同努力，克服阻碍问题，推动 5G 毫米波基站 OTA 射频指标测试技术的突破与进展。
- 支持更高的频段。毫米波高频段拥有丰富的频谱资源，是满足未来大容量通信需求的必由之路。3GPP NR Rel-15 中定义的毫米波频段 FR2 上限为 52.6 GHz，目

前 3GPP NR Rel-17 已经开展对 52.6 ~ 71 GHz 毫米波频段的通信研究，将优先考虑面向新扩展的 60 GHz 频段制定 5G NR 标准，而 60 GHz 近期已被世界无线电大会确定为部分国家和地区的国际移动通信 (IMT) 频段。在 3GPP NR Rel-18 及以后，首先会考虑支持 100 GHz 附近的毫米波频段，比如设计支持到 114.25 GHz 毫米波频段的空口特性。这些 5G 毫米波频段比现有 FR2 的毫米波频段更为丰富，所提供的峰值吞吐量会更高。预计未来 5G 毫米波的发展方向必将扩展到 100 GHz 以上，甚至达到 300 GHz 的毫米波频段。更高频段 5G 毫米波通信被认为会在很多方面带来变革，比如移动数据分流、短距机器通信、宽带分发网络、IAB 组网、工业互联网、AR/VR、智能交通、数据中心无线连接等。与此同时，更高频段 5G 毫米波通信也会带来复杂的技术问题，比如更强的相位噪声、更严重的路损、更严重的空气吸收、更低的功放效率等，这些将是 5G 毫米波技术未来面临的挑战。

随着 5G 建设加速推进和应用终端日益丰富，5G 毫米波市场也将迎来广阔的发展空间。总而言之，5G 未来图景让人倍感兴奋，更多 5G 创新正在孕育之中，5G 毫米波网络将赋能未来十年及以后的持续性科技突破。

引用文献

- 【1】 <https://www.qualcomm.com/news/onq/2020/06/01/mmwave-5g-devices-powered-qualcomm-snapdragon-can-deliver-4x-faster-5g>
- 【2】 Regional Spotlights: Impact of mmWave 5G, GSMA, 2019 年 7 月。
- 【3】 5G 毫米波在中国的机遇, GSMA, 2020 年 3 月。
- 【4】 mmWave Bands – Global Licensing and Usage for 5G, GSA, 2020 年 6 月。
- 【5】 GTI 5G mmWave Spectrum White Paper, GTI, 2019 年 1 月。
- 【6】 <https://www.nttdocomo.co.jp/english/product/data/sh52a/>
- 【7】 关于加快 5G 发展的通知, 工业和信息化部,
- 【8】 5G 推进组微信公众号, 2020 年 9 月 2 日、9 月 3 日、9 月 15 日、9 月 16 日文章。
- 【9】 3GPP TR38.901, https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.901/38901-g10.zip
- 【10】 中国联通 5G 毫米波技术白皮书, 中国联通, 2019 年 11 月。
- 【11】 <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2020/9/ericsson-qualcomm-and-u.s.-cellular-achieve-extended-range-5g-data-call-over-mmwave>
- 【12】 中国电信 5G 技术白皮书, 中国电信, 2018 年 6 月。
- 【13】 5G NR mmWave outdoor and indoor deployment strategy, 2019 年 5 月, <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/deploying-5g-nr-mmwave-for-indoor-outdoor.pdf>
- 【14】 “中国智能制造：长期稳步推进”，德勤 (2018), <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/energy-resources/deloitte-cn-eri-2018-china-smartmanufacturing-report-en-190403.pdf>。

致谢

本报告调研、撰写、审阅过程中得到了包括以下单位在内（以拼音顺序排列）的产业各方专家学者的大力支持和帮助，在此表示真诚的感谢！如有遗漏敬请谅解！

- 德勤
- 东南大学
- 爱立信
- 高通
- 广和通
- 华为
- MediaTek
- 诺基亚贝尔
- OPPO
- 三星电子
- 是德科技
- Strategic Analysis
- VIAVI
- vivo
- 小米手机
- 芯讯通
- 一加手机
- 移远通信
- 紫光展锐
- 中国电信
- 中国联通
- 中国移动
- 中信科
- 中兴通讯

本报告获准使用以下单位的报告内容、数据和案例，在此特别表示感谢！

- 中国联通
- 高通
- 中兴通讯
- 诺基亚贝尔
- 爱立信
- 一加手机
- OPPO
- 是德科技
- 德勤
- 中国电信



GSMA 总部

Floor 2

The Walbrook Building

25 Walbrook

London EC4N 8AF

United Kingdom

电话: +44 (0) 20 7356 0600

传真: +44 (0) 20 7356 0601